LA GRAVEDAD CUÁNTICA

La desaparición del espacio y el tiempo

PEDRO NARANJO

RBA

© Pedro Naranjo Pérez, 2017.
© de esta edición digital: RBA Libros, S.A., 2019.
Diagonal, 189 - 08018 Barcelona.
www.rbalibros.com
REF.: ODBO473
ISBN: 9788491874102
Composición digital: Newcomlab, S.L.L.
CREATIVE COMMONS

Índice

Introducción

La revolución inconclusa

Átomos de espacio-tiempo

Cosmología cuántica

Observando las escalas más pequeñas

Bibliografía

Introducción

El siglo XX fue testigo de una revolución científica espectacular, comparable al surgimiento de la filosofía en la escuela de Mileto hace veintiséis siglos, que introdujo por primera vez la noción de causa natural para la explicación del mundo físico, rompiendo con la mitología y su pléyade de dioses. Comparable también al heliocentrismo de Copérnico, que desterró a la humanidad del centro del cosmos conocido, o a la teoría de la evolución de Darwin, que bajó al ser humano del Olimpo, situándolo junto al resto de las criaturas, e incluso a la reciente secuenciación del genoma humano, que promete llevar a nuestra especie a una fase sin precedentes. En efecto, dos teorías físicas sacudieron los cimientos del conocimiento humano a principios del siglo XX: una de ellas revolucionó nuestra comprensión del espacio, el tiempo y la materia; la otra expulsó el determinismo de las ecuaciones que rigen el microcosmos y las dotó además de un carácter discreto (los resultados de las medidas solo pueden ser ciertos valores). La primera es la relatividad general de Einstein; la segunda, la mecánica cuántica iniciada por Planck en 1900 y desarrollada por varios autores durante las tres décadas siguientes.

En primera instancia, puede parecer exagerado situar la relatividad general y la mecánica cuántica al mismo nivel que hitos como los citados al comienzo. Ciertamente, las ideas copernicana y darwiniana, además de suponer un

avance mayúsculo en la ciencia, hicieron saltar por los aires el aura de «especial» del ser humano, como un noble medieval al que, de repente, le dicen que el rey ha caído y que ya no va a gozar más de sus privilegios. La relatividad general y la mecánica cuántica no hicieron nada parecido a esto. Cada una de estas teorías, sin embargo, alteró de manera tan profunda conceptos tan arraigados en la mente humana que merecen entrar en el selecto grupo de las ideas científicas revolucionarias.

No obstante, cuando realizamos el viaje de lo muy grande a lo muy pequeño, y viceversa, descubrimos que las leyes que gobiernan cada una de esas escalas son incompatibles entre sí. No existe ninguna evidencia que indique que el universo haya de estar regido por distintas leyes a diferentes escalas, pero la mecánica clásica, que rige nuestra escala cotidiana, es distinta de la relatividad general. ¿Contradicción? En absoluto. La mecánica clásica (la gravitación universal de Newton y el electromagnetismo de Maxwell), como toda teoría científica, es aplicable dentro de un determinado dominio (desde las mareas y el arcoíris hasta el movimiento de planetas y satélites), es decir, representa una buena aproximación de los fenómenos naturales en tal rango. Pero, para velocidades grandes, comparables a la de la luz en el vacío, y masas grandes, del orden de varias masas solares, la mecánica clásica deja de describir correctamente los hechos. Ni siquiera es una buena aproximación. Es entonces cuando hemos de recurrir a la relatividad general, que extiende la mecánica clá-

sica hasta escalas cosmológicas. Pero lo hace de tal forma que, en el límite de velocidades y masas pequeñas, sus ecuaciones se reducen a las de Newton y Maxwell. Análogamente, la mecánica cuántica generaliza la mecánica clásica hasta el microcosmos, de manera que esta última se recupera al aumentar la escala del sistema. El problema es que la relatividad general no extiende la mecánica cuántica en ningún sentido. Ni viceversa. Necesitamos una teoría más fundamental que contenga ambas. Dicha teoría, aún por descubrir, es lo que los físicos teóricos llaman *gravedad cuántica*. La siguiente analogía es ilustrativa. Supongamos que miramos desde el exterior una pared con dos ventanas iluminadas, de modo que solo percibimos lo que hay detrás de cada una, pero no el resto de la habitación. Pues bien, la relatividad general y la mecánica cuántica son estas ventanas, mientras que la gravedad cuántica es la habitación completa a la que accedemos al abrir la puerta.

La necesidad de la gravedad cuántica la reveló el propio Einstein al año siguiente de introducir la relatividad general, antes incluso de que la mecánica cuántica se completase una década después. En la década de 1930 se inició la búsqueda sistemática de la teoría. Desafortunadamente, pronto quedó patente que la tarea era más ardua de lo previsto, y desde entonces tal búsqueda se ha convertido en un tormentoso viaje, con momentos de gran entusiasmo seguidos de periodos de dolorosa frustración, como la del escalador que, exhausto tras haber completado uno de los ochomiles, des-

cubre que le quedan trece más por escalar. Por el camino, se han propuesto numerosas ideas, muchas erróneas, otras incompatibles entre sí, hasta alcanzar cierta coherencia en la forma de diferentes teorías que son objeto de investigación en la actualidad. En este libro nos centraremos en una en particular, conocida como *gravedad cuántica de bucles*. El interés de esta teoría es doble. Por un lado, es minimalista, en el sentido de que evita la introducción de ideas especulativas (al contrario que, por ejemplo, la teoría de supercuerdas, que requiere dimensiones espaciales extra, entre otras cosas): la gravedad cuántica de bucles solo tiene las tres dimensiones espaciales familiares y ningún elemento adicional. Por otro lado, respeta el legado conceptual de la relatividad general, a saber, que el espacio-tiempo no es una entidad absoluta, estática, sino dinámica, expuesta a la danza cósmica con la materia (esta propiedad se desecha en las supercuerdas, donde se vuelve a la concepción del espacio-tiempo anterior a la relatividad general). Es importante resaltar desde el principio esta distinción: la gravedad cuántica de bucles es una teoría de la gravedad cuántica cuyo principio es la unión consistente de los conceptos revolucionarios, y confirmados experimentalmente de forma asombrosa, de la relatividad general y la mecánica cuántica. Sin elementos accesorios, solo relatividad general y mecánica cuántica. Por tanto, lo que resulta de estas premisas es una teoría donde el espacio-tiempo es dinámico, discreto (existen «átomos de espacio-tiempo») y

probabilístico; esto es, en esencia, la gravedad cuántica de bucles.

La imagen que la gravedad cuántica de bucles ofrece de las escalas más fundamentales del universo tiene un cierto carácter pintoresco. El espacio, ese concepto tan enraizado en nuestra mente, se vuelve discreto, baila al son de la materia, cual granos de arena arrojados al aire y mecidos por el viento. La diferencia crucial es que entre dos granos de arena hay algo: espacio (vacío o no). Entre dos granos, «átomos», de espacio-tiempo no hay nada. Ni siquiera vacío. Nada de nada. Estos átomos de espacio-tiempo son las unidades elementales de la gravedad cuántica de bucles.

La gravedad cuántica de bucles también tiene mucho que decir a escalas cosmológicas. En particular, el mismo inicio del universo se pone en tela de juicio. El famoso Big Bang, la singularidad o punto inicial que la gran mayoría de los físicos toma como el origen de todo, desaparece en la gravedad cuántica de bucles. En su lugar, se predice un «rebote» al considerar la actual expansión del universo hacia atrás en el tiempo. Esta situación se puede entender como la existencia de un universo «oscilante», que sufre fases de expansión y contracción sucesivas. Pero, desde un punto de vista conceptual, lo más relevante es la eliminación de la necesidad de un origen del universo, que en Occidente se suele tomar como una especie de dogma (incluso muchos cosmólogos siguen hablando del Big Bang como un hecho).

Además de dinamitar el Big Bang, la gravedad cuántica de

bucles también predice una de las ecuaciones más celebradas y estudiadas de la física, la que describe la *entropía* de un agujero negro. La entropía es una manera de medir la «información perdida» de un sistema físico, es decir, lo que un sistema tiene pero no puede usarse. En la década de 1970, Bekenstein y Hawking derivaron una ecuación que ligaba la entropía de un agujero negro con el área de su *horizonte de sucesos*, algo así como una superficie imaginaria que separa las regiones del espacio-tiempo «fuera» y «dentro» del agujero. La gravedad cuántica de bucles predice dicha ecuación, dotándola, además, de una explicación geométrica, según la cual los átomos de espacio-tiempo son los estados microscópicos de dicho horizonte de sucesos.

Finalmente, la búsqueda de la gravedad cuántica también nos permite aprender varias lecciones sobre el concepto mismo de ciencia. Su historia, aun teniendo solo cien años, nos muestra cómo los sentimientos humanos pueden cobrar tanta relevancia que incluso llegan a dominar sobre el razonamiento. Dado que la observación de cualquier efecto asociado a la gravedad cuántica es extremadamente complicada, los físicos han de recurrir a otros criterios, como la coherencia matemática, que les sirvan de guías para la construcción de una teoría física. Esta situación ha propiciado que las diferentes teorías propuestas como solución al problema de unir la relatividad general y la mecánica cuántica sean muy sofisticadas matemáticamente, lo que hace difícil discernir lo realmente físico de lo puramente abstracto. Los físicos teóri-

cos anhelan la llegada de datos observacionales que les ayuden a separar el trigo de la paja. El problema es que algunas teorías contienen tanta paja que se les olvida que es el trigo lo que deben buscar.

En este libro veremos cómo nos ayuda la historia de la física a arrojar luz sobre el camino que queremos explorar. Todos los grandes avances de la física se han llevado a cabo gracias a una profunda reflexión acerca de las teorías anteriores que describen su dominio de la realidad de forma espectacular. «Tirarse a la piscina» a probar alguna idea es inútil. En nuestro caso, nos tomaremos muy en serio tanto la relatividad general como la mecánica cuántica en la búsqueda de la anhelada gravedad cuántica.

La revolución inconclusa

La ciencia se desarrolla en dos etapas: en la primera, el trabajo del científico es aplicar un conjunto de leyes bien establecidas al mayor número posible de fenómenos; en la segunda, nuevas mediciones y resultados (a veces inesperados), o la visión de científicos excepcionales, evidencian que los cimientos de las teorías, aparentemente sólidos, están a punto de quebrarse. Estas dos etapas son esencialmente distintas. La segunda corresponde a las revoluciones científicas, en una de las cuales está inmersa la física teórica actual.

En 1900 el físico alemán Max Planck, tras varios fracasos propios y ajenos, finalmente logró encontrar la expresión que describía la distribución de energía asociada a la radiación emitida por un *cuerpo negro*, esto es, un objeto ideal que no refleja radiación alguna. La novedad de Planck fue asumir que la energía no es algo continuo, sino discreto, formada por pequeños «paquetes» llamados fotones. La idea es que, al igual que la materia no es continua cuando se observa a escalas muy pequeñas gracias al microscopio electrónico, sino que está formada por átomos, la radiación está constituida por «átomos de luz». Estos son los fotones. Con su descubrimiento, Planck rompía con la física clásica imperante del físico inglés Isaac Newton y el escocés James Clerk Maxwell, dando lugar a la revolución cuántica.

En 1915, el también físico alemán Albert Einstein finalizó el tortuoso viaje intelectual de una década que le llevó a generalizar la teoría de Newton de la gravitación. Su teoría, conocida como relatividad general, despojó a la física de los conceptos absolutos de espacio y tiempo, introducidos por el genio inglés en 1687. La idea revolucionaria de Einstein fue asociar la gravitación con la geometría del espacio: la gravitación «es» la curvatura del espacio. Las

implicaciones conceptuales de esta teoría aún no se han digerido apropiadamente un siglo después, dado que el espacio deja de ser una estructura fija donde ocurren los fenómenos naturales para pasar a formar parte de los fenómenos dinámicos y cambiantes.

Planck y Einstein iniciaron una revolución que sigue vigente hoy día. Las teorías de las que fueron pioneros sacudieron el edificio del conocimiento clásico. La física cuántica introdujo lo discreto y probabilístico; la relatividad, el carácter dinámico del espacio. Sin embargo, a pesar del tremendo esfuerzo de miles de físicos durante el último siglo, ambas teorías han de completarse, pues cada una muestra indicios de la existencia de una teoría más fundamental. Ahora bien, la principal razón por la cual cada una de ellas está inacabada es la existencia misma de la otra: los principios físicos sobre los que se basa la una son incompatibles con la otra. Este es el gran desafío de la física teórica moderna. El reto de la *gravedad cuántica* es la construcción de una teoría que reconcilie lo cuántico y lo relativista.

Esta situación es análoga a tantas otras en la historia de la física. Al contrario de lo que pueda parecer, la contradicción entre dos teorías satisfactorias no es un problema, sino una oportunidad de oro para el progreso. Así, Newton descubrió la gravitación universal combinando las parábolas del físico italiano Galileo Galilei con las elipses del astrónomo alemán Johannes Kepler. Einstein construyó la relatividad especial para resolver la aparente tensión entre la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell; una década más tarde, el genio alemán descubrió que el espaciotiempo es curvo para reconciliar la gravitación newtoniana con la relatividad especial. Más aún, estos y otros grandes avances en física se han logrado sin apenas resultados experimentales nuevos.

Por ejemplo, en el siglo XVI el astrónomo polaco Nicolás Copérnico construyó su modelo heliocéntrico y fue capaz de calcular las distancias de los planetas al Sol usando únicamente las observaciones astronómicas del *Almagesto* de Ptolomeo, del siglo II.

Planck y Einstein, fundadores de las bases de la física cuántica, fotografiados en 1929 durante la entrega a Einstein de la Medalla Max Planck, por su contribución a la física teórica.

Esta es, precisamente, la situación actual con la gravedad cuántica. La ausencia de evidencia empírica directa sobre los efectos cuánticos de la gravitación está lejos de ser algo dramático: Copérnico, Einstein y, en menor medida, Newton comprendieron algo nuevo sobre el universo sin apenas nueva evidencia experimental, simplemente comparando dos teorías satisfactorias en aparente contradicción.

Conviene aclarar una cuestión sobre la construcción de teorías en ausencia de evidencia experimental. Esto no entra en conflicto con el hecho de que el conocimiento científico tenga una base empírica. Ciertamente, una teoría pasa el juicio de la naturaleza en el momento en que es confirmada por evidencia experimental nueva. Pero también el descubrimiento en sí mismo de una nueva teoría tiene una base empírica incluso sin nuevos resultados experimentales: esta base es el contenido empírico de las teorías anteriores. El avance se realiza mediante el esfuerzo de hallar el marco conceptual que encapsule tales teorías previas.

LOS DOS PILARES DE LA FÍSICA

La revolución iniciada por Planck y Einstein constituye los cimientos sobre los que descansa la física actual. Nos sumergiremos en las profundidades conceptuales tanto de la relatividad general como de la mecánica cuántica, con la intención prioritaria de enfatizar la tensión existente entre ambas, responsable del carácter infructuoso y tortuoso de la búsqueda de la gravedad cuántica, con idea de analizar con algo más de detalle la «oportunidad de oro» mencionada antes.

El espacio y el tiempo se convierten en actores

Desde que el gran Newton publicase sus *Principios matemáticos de la filosofía natural* en 1687, la física había considerado el espacio y el tiempo como objetos absolutos, externos y eternos, sin que nada pudiese alterarlos. La trama cósmica experimentaba incesantes cambios: manzanas que caían, planetas que orbitaban, luz que se propagaba… Pero el espacio y el tiempo permanecían incólumes.

Esta visión absoluta del espacio y el tiempo duró hasta 1905, el *annus mirabilis* de Einstein. El físico alemán, en su intento de reconciliar el principio de relatividad de Galileo, según el cual las leyes de la física son las mismas en todo sistema inercial (que se halla en reposo o se mueve con movimiento uniforme respecto de otro sistema), con el electromagnetismo de Maxwell, elevó a principio la invariancia de la velocidad de la luz en el vacío, de modo que esta es la misma con independencia del estado de movimiento (el reposo es movimiento nulo) de la fuente y el receptor. La consecuencia inmediata de ello es que el espacio y el tiempo pierden su estatus de absolutos y eternos: no tiene sentido físico hablar de la «posición», sin más, de un objeto, ni del «tiempo», a secas, que ha durado tal proceso. En su lugar, el espacio y el tiempo son conceptos relativos al observador. Más aún, ambos se fusionan en una estructura llamada *espacio-tiempo*, introducida por el matemático polaco-alemán Hermann Minkowski en 1907.

Sin embargo, el espacio-tiempo de la relatividad especial seguía conservando cierto vestigio del absolutismo clásico. Era diferente para cada observador, sí, pero inmutable: un observador dado no podía modificar su espacio-tiempo. Ni ninguno, claro. Además, la relatividad especial se olvidaba de una clase bastante grande de movimientos. En efecto, la aceleración no existía en ella. Eso era

una acusada deficiencia de la teoría, pues solo se aplicaba a los casos especiales donde la velocidad era constante. Por ello, Einstein decidió generalizar la teoría para que incluyese el movimiento acelerado. El resultado es la teoría de la relatividad general, que tiene las siguientes características:

— La gravitación «es» la curvatura del espacio-tiempo. Supongamos una cama elástica. Si colocamos sobre ella una bola pesada, la cama se hunde, se curva. La cama es el espacio-tiempo y su curvatura es la gravedad. Por tanto, la geometría euclídea deja paso a la geometría de Riemann (la generalización de la geometría euclídea al caso de espacios matemáticos curvos), construida por el matemático alemán Bernhard Riemann en la segunda mitad del siglo XIX, donde la curvatura tiene el efecto de hacer que la suma de los tres ángulos de un triángulo pueda ser mayor o menor de 180º.

— El espacio-tiempo no es una entidad absoluta e inmóvil, sino que se convierte en una estructura dinámica, cambiante, como cualquier otro fenómeno físico. No es que sea simplemente relativo al observador, como en la relatividad especial, sino que el observador realmente modifica la geometría del espacio-tiempo.

— Como toda teoría clásica (no cuántica), es determinista, lo que quiere decir que, conocido el estado de un sistema en un punto dado del espacio-tiempo, se puede calcular el estado del mismo en cualquier otro punto del espacio-tiempo.

— De nuevo, como en toda teoría clásica, los valores de las magnitudes físicas toman los valores en el *continuo* de los números reales. Si medimos la distancia entre dos objetos con una regla, el valor puede ser cualquier número entre 0 y 1, digamos: 0,8; 0,82; 0,819… La restricción es técnica (la precisión de la regla), no fundamental.

— Es una *teoría de campos*. Un campo es simplemente una magnitud física extendida por el espacio-tiempo, es decir, no

está localizada en una posición concreta. En la física newtoniana, la magnitud fundamental es la partícula puntual, cuya posición era solo un punto concreto del espacio-tiempo, sin volumen. El concepto de campo como una entidad física lo propuso el físico inglés Michael Faraday en 1849. Posteriormente, James Clerk Maxwell construyó su teoría del campo electromagnético. En el caso de la relatividad general, tenemos el campo gravitatorio. La dificultad inherente al concepto de campo es la necesidad de conocer su valor en todos los puntos del espacio-tiempo, lo que conlleva conocer infinitos valores. En el caso de la gravitación, donde la geometría del espacio-tiempo es cambiante, con un potencial de infinitas posibilidades, se necesitan infinitas variables.

El extraño mundo subatómico

El segundo pilar de la física moderna es la teoría cuántica, cuyo camino inició Planck. Sin embargo, al contrario que la relatividad general, obra de una única persona, la teoría cuántica fue moldeada durante tres décadas por los mejores físicos de la época. Planck, el propio Einstein, el danés Niels Bohr, el francés Louis de Broglie, el austriaco Erwin Schrödinger, el inglés Paul Dirac, el estadounidense John von Neumann, el suizo Wolfgang Pauli y los alemanes Werner Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan son las figuras más prominentes. Las principales características de la mecánica cuántica son:

— El espacio y el tiempo vuelven a su estatus newtoniano, fijo, externo y eterno. Esta propiedad es el verdadero problema de la gravedad cuántica.

— Un sistema físico puede estar en una *superposición de estados* simultáneamente. Imaginemos un electrón. Su posición no es un número concreto en un sistema de referencia dado; en su lugar, tenemos todo un elenco de posibles lugares donde el electrón puede estar. Este elenco es la superposición,

mientras que cada uno de los posibles lugares es un estado de la misma.

— Es una teoría *probabilística*. No podemos decir que una partícula esté aquí o allí. Únicamente es posible saber la probabilidad de que nuestro electrón se encuentre en uno de los estados de la superposición.

— Los valores de las magnitudes físicas solo pueden ser ciertos números reales. Decimos en este caso que los valores son *discretos*. Históricamente, Planck discretizó la energía, pero hoy día hay teorías en las que casi toda magnitud física tiene su versión discreta, a excepción de la geometría del espacio-tiempo, que sigue siendo clásica (no cuántica).

— Existen pares de magnitudes físicas cuyos valores no pueden medirse simultáneamente con precisión arbitraria, esto es, con la precisión que se desee: si medimos con muy buena precisión una de estas magnitudes, necesariamente podremos obtener muy poca información sobre la otra. Lo importante aquí es que esta limitación en la precisión de la medida es fundamental, es decir, está impuesta por las leyes de la física cuántica, y no algo técnico debido a la mayor o menor precisión del aparato de medida. Este es el contenido de las famosas relaciones de indeterminación de Heisenberg de 1927. El caso de la posición y el momento lineal (el producto de la masa por la velocidad) es el ejemplo más conocido.

Mientras que la relatividad general es la teoría de una fuerza concreta (gravitación), la teoría cuántica es una forma general de dinámica, que se aplica a un conjunto enorme de diferentes sistemas físicos. Así, tenemos la física molecular, atómica, nuclear y, finalmente, de partículas, que describe el resto de las fuerzas fundamentales en el llamado *modelo estándar* de partículas.

Sin duda, el conflicto real entre la relatividad general y la mecánica cuántica es la manera tan distinta en que tratan el espacio y el tiempo. El carácter probabilístico y discreto, así como las res-

tricciones en las medidas de ciertas magnitudes, por muy antiintuitivos que sean, no son un problema a la hora de construir una teoría. El modelo estándar cumple todo esto. Y el acuerdo entre teoría y observación es impresionante. El auténtico escollo que trae de cabeza a los físicos teóricos desde hace ya un siglo es la diferencia radical entre los conceptos de espacio y tiempo en una y otra teoría. La dificultad del problema, así como su belleza, es el simple hecho de que la relatividad general no es solo una teoría de la gravitación clásica, sino una modificación radical de nuestro entendimiento de la naturaleza del espacio y el tiempo. El descubrimiento de Einstein es que el espacio-tiempo y el campo gravitatorio son la misma entidad física. Y la mecánica cuántica nos ha enseñado que todos los campos poseen propiedades cuánticas a alguna escala. Por tanto, esperamos que el espacio-tiempo también exhiba propiedades cuánticas.

Lo que ello implica es que hemos de ir un paso más allá en nuestra comprensión del espacio-tiempo para extenderlo al ámbito cuántico. El espacio (matemático) de Riemann no parece ser el indicado para ser la base de la gravedad cuántica, puesto que la geometría de Riemann asume un espacio (matemático) continuo, algo que la mecánica cuántica ha desterrado de la física fundamental. Para resolver el problema, tenemos que ser capaces de entender qué es el espacio-tiempo cuántico.

CUESTIÓN DE ESCALAS

La búsqueda de una teoría cuántica de la gravitación es particularmente ardua. Por una sencilla razón: la gravitación es, de lejos, la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales. No es solo que

en el mundo subatómico las otras tres fuerzas eclipsen los efectos de la gravedad (la mayoría de las partículas elementales, como el fotón, no están dentro del átomo), sino que la escala a la cual se estima que los efectos cuánticos de la gravitación son importantes es ridículamente pequeña. Para verlo, juguemos con tres constantes de la naturaleza. La primera, la constante de gravitación de Newton, *G*, mide la intensidad de la gravedad. La segunda, la velocidad de la luz en el vacío, *c*, es el límite superior de la velocidad a la que puede propagarse cualquier fenómeno. La tercera, la constante de Planck, *h*, marca la escala a la cual no pueden despreciarse los efectos cuánticos de un sistema físico. Las dos primeras aparecen en la relatividad general, reconciliando el éxito empírico de la teoría de Newton con la relatividad especial, uno de cuyos postulados es la citada propiedad de la velocidad de la luz en el vacío. Por su parte, la velocidad de la luz en el vacío y la constante de Planck aparecen en las teorías cuánticas de las otras tres fuerzas fundamentales. Resulta bastante razonable que la gravedad cuántica, la unión de la relatividad general y la mecánica cuántica, incluya las tres constantes. Pero este hecho, en sí mismo, no aclara por qué es tan minúscula la escala a la que no podemos obviar los efectos cuánticos de la gravitación. Planck se dio cuenta de que, salvo factores numéricos, existe una única manera de usar estas tres constantes para definir una longitud. El resultado, conocido como *longitud de Planck*, es un número absurdamente pequeño: $1{,}6 \cdot 10{-}35$ m. Puesto que esta longitud es única si se usan solo las constantes *G*, *c* y (constante de Planck reducida, es decir, dividida por 2 p), se espera que sea esta la escala a la cual los efectos cuánticos de la gravitación sean relevantes. Muy por encima de esta longitud se puede tratar el espacio-tiempo como algo continuo.

A la longitud de Planck no tiene sentido hablar de distancias, pues únicamente tenemos «átomos de espacio-tiempo», entre los cuales no hay nada de nada.

Si se comparan las cuatro fuerzas fundamentales, la más intensa es la fuerza nuclear fuerte, responsable de mantener unidos los protones del núcleo atómico. La siguiente es el electromagnetismo, que actúa sobre todos los cuerpos con carga eléctrica; además, es la responsable de mantener unidos el núcleo atómico y las «órbitas» de los electrones alrededor de aquel, de modo que el átomo queda cohesionado. La tercera en intensidad es la fuerza nuclear débil. Como la fuerza fuerte, solo actúa a nivel nuclear. Es la responsable de los procesos radiactivos, que son esenciales en la *fisión nuclear*, el proceso mediante el cual un núcleo o un nucleón (que es una partícula dentro del núcleo: protón o neutrón) se descompone en elementos más ligeros. Finalmente tenemos la gravitación, con mucho la fuerza más débil de las cuatro. Este es el motivo por el que sus efectos cuánticos son tan difíciles de detectar, pues quedan eclipsados por las otras tres. Por tanto, hay que buscar la gravedad cuántica en procesos donde la fuerza dominante sea la gravitación, como los agujeros negros o las primeras fases del universo.

LOS AMIGOS ENFRENTADOS: DOS VISIONES DE LA GRAVEDAD CUÁNTICA

El enunciado del problema de la gravedad cuántica no deja de ser controvertido. Tal como se ha presentado, la gravedad cuántica es la unión de la relatividad general y la mecánica cuántica. Nada más. Sin embargo, este enfoque de la cuestión no es único, ni siquiera el más extendido. De hecho, la comunidad científica alberga

numerosas y variadas hipótesis. La investigación de diversas ideas para la resolución de un problema dado es algo muy sano en ciencia: cuantas más ideas se exploren, mayores son las opciones de dar con la tecla correcta. A pesar de esta variedad, los diferentes físicos que trabajan en el problema de la gravedad cuántica pertenecen, esencialmente, a dos escuelas de pensamiento.

El físico de partículas

La física de partículas se encarga del estudio de la materia a escalas muy pequeñas. Aunque Demócrito propuso la idea del atomismo hace ya veinticinco siglos, hasta finales del siglo XIX no se consideró seriamente la posibilidad de que la materia no fuese continua, sino que estuviese compuesta de diminutos trozos o átomos. Durante el siglo XX, los experimentos revelaron la existencia de partículas dentro del propio átomo, además de otra serie de partículas, de tamaño y masa similares a aquellas, que no se hallan en el interior atómico. Todas estas minúsculas partículas son el objeto de estudio de los físicos de partículas.

La segunda mitad del siglo pasado supuso un avance monumental en la descripción de las partículas elementales. En la década de 1970 se culminó el esfuerzo tanto teórico como experimental de varios grupos de investigación. El resultado fue el modelo estándar de la física de partículas mencionado antes. Este modelo describe con una precisión sin parangón la práctica totalidad de los fenómenos naturales de origen no gravitatorio. En efecto, aporta una explicación de las otras tres fuerzas fundamentales, a saber, el electromagnetismo y las dos fuerzas nucleares. Por tanto, desde el punto de vista de un físico de partículas, la gravedad es solo la última y más débil de las fuerzas fundamentales. ¿Por qué no aplicar las técnicas que tan buen resultado han dado en los otros casos?

Tras años de momentos de excitación y amarga decepción en dosis iguales, la continuación natural de las ideas del modelo estándar al problema de la gravedad cuántica ha desembocado en la teoría de supercuerdas.

En esta teoría la gravedad es simplemente una más de las diferentes vibraciones de las cuerdas elementales. Así, el electrón, el protón o la fuerza electromagnética no son más que vibraciones, con distintas propiedades, de dichas cuerdas. Más aún, los físicos de supercuerdas asumen que una teoría cuántica de la gravedad solo es viable en el contexto de la unificación de esta con las otras tres fuerzas fundamentales (la mal llamada «teoría del todo»), en claro contraste con el enunciado del problema descrito en la página anterior, donde no se considera unificación alguna, solo la unión de la relatividad general y la mecánica cuántica, obviando el resto de las fuerzas. Finalmente, si bien es cierto que los modelos más recientes de supercuerdas consideran espacio-tiempos curvos, estos siguen siendo estáticos, asumiéndose su forma desde el principio. Por tanto, desde un punto de vista conceptual, lo más importante es resaltar que en esta teoría se vuelve a la visión de un espacio-tiempo absoluto y eterno (curvo o no). Como ejemplo ilustrativo, podemos pensar en la teoría de supercuerdas como un gran teatro: el escenario es el espacio-tiempo; los actores, los fenómenos naturales (partículas, fuerzas…). Por muchas filigranas que el guionista pretenda que tenga la obra, el escenario no va a cambiar. Seguirá siendo liso. Incluso, si queremos llamar la atención del público, podemos pensar en un escenario con repechos o baches. Nada de lo que hagan los actores en esta obra cósmica cambiará la forma del escenario. Habrá los mismos repechos y baches

antes y después de la obra. El mayor legado de Einstein, de su relatividad general, simplemente se borra de un plumazo.

El físico relativista

La visión sobre el problema de la gravedad cuántica de un relativista es la opuesta a la del físico de partículas. Un relativista tiene grabado a fuego el legado conceptual de la relatividad general: el espacio-tiempo no es una estructura absoluta, fija, eterna; muy al contrario, es tan dinámico como cualquier otro elemento, ya sea una partícula o una fuerza. Sí, una fuerza. Recordemos que en la relatividad general la gravedad es la curvatura del espacio-tiempo. Para el relativista, la relatividad general es mucho más que la teoría de una fuerza concreta: es el entendimiento de que ciertas nociones clásicas sobre el espacio y el tiempo no son válidas a nivel fundamental, es decir, a las escalas más pequeñas de la naturaleza. Una de tales nociones inadecuadas es, precisamente, la existencia de un espacio-tiempo absoluto y fijo sobre el cual se desarrollan los fenómenos.

La relatividad general nos ha enseñado dos cosas: que el espacio y el tiempo son entidades dinámicas y, además, que la localización de un suceso en el espacio y en el tiempo es *relacional*, esto es, que la posición espacial y el valor temporal de un suceso carecen de significado físico *per se*. Solo tiene sentido hablar de la posición y el tiempo en relación con un observador dado, ya sea una persona con una regla y un cronómetro, o un ordenador. Por su parte, la mecánica cuántica nos ha enseñado que la naturaleza es discreta y probabilística.

En nuestro símil teatral, la obra del relativista muestra un aspecto esencialmente distinto: el público asiste con estupor a una representación donde únicamente hay actores. El escenario de las

supercuerdas (liso o con repechos) se desvanece y se convierte en uno de los actores.

Para el relativista, la gravedad cuántica es el esfuerzo de terminar la profunda revolución conceptual iniciada con la relatividad general y la mecánica cuántica hace ya un siglo.

APRENDIENDO DE LOS ERRORES:

EL PROBLEMA DE LA GRAVEDAD CUÁNTICA

Resulta muy instructivo examinar las ideas que se han propuesto para encontrar la gravedad cuántica. Repasar la historia de una búsqueda de un siglo de antigüedad nos enseñará qué ideas hay que desechar y cuáles retener.

El mensaje principal de la relatividad general, como hemos enfatizado, es que la geometría del espacio-tiempo es dinámica, evolucionando al son del movimiento de la materia. Por tanto, no tenemos una ley que nos diga cuál es la geometría, sino una que gobierna de qué manera cambia tal geometría. Antes de Einstein se pensaba que la geometría (en concreto, la euclídea) formaba parte de las leyes naturales. Es crucial asimilar bien esta idea: la geometría del espacio-tiempo no forma parte de las leyes físicas. Como resultado, no hay nada en esas leyes que nos indique cuál es la geometría del espacio-tiempo: solo descubrimos cuál es después de resolver las ecuaciones de la relatividad general.

Apenas un año después de encontrar las ecuaciones de la relatividad general, Einstein se dio cuenta de que su teoría implicaba la existencia de *ondas gravitatorias*. En el caso del océano, las ondas (llamadas olas) son las oscilaciones verticales del nivel del agua.

En la relatividad general, el océano es la geometría del espacio-tiempo; las olas, las ondas gravitatorias, el cambio en la geometría misma del espacio-tiempo. Además, estas ondas gravitatorias transportaban energía. Y Planck había demostrado que la energía de cualquier sistema físico es una magnitud discreta, formada por fotones (hecho que, como hemos indicado, desencadenó la revolución cuántica). En el primer artículo conocido sobre ondas gravitatorias, Einstein escribió que «parece que la teoría cuántica habrá de modificar no solo las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, sino también la nueva teoría de la gravitación». Estas ondas gravitatorias fueron finalmente observadas por el equipo LIGO en 2015. Este descubrimiento abre una nueva ventana en la exploración del cosmos.

Desafortunadamente, esta advertencia de Einstein no dio sus frutos. No podía; era demasiado prematura. En efecto, por aquel entonces nadie sabía cómo aplicar la, aún inacabada, teoría cuántica (se completaría una década después) a una teoría en la cual la geometría del espacio-tiempo era dinámica, como era la relatividad general. Como consecuencia de ello, los físicos planearon una estrategia. Antes de tratar de cuantizar la relatividad general, lo más eficiente era centrarse en la otra fuerza conocida en la época: el electromagnetismo. La teoría de Maxwell compartía con la relatividad general el hecho de ser ambas teorías de campos, pero tenía la ventaja de que, al contrario que esta última, sí se podía describir suponiendo un espacio-tiempo estático. La recompensa era proporcionar a los físicos experiencia a la hora de aplicar la teoría cuántica a una teoría de campos, es decir, lidiar con las infinitas variables correspondientes a los valores del campo en todo el espacio-tiempo.

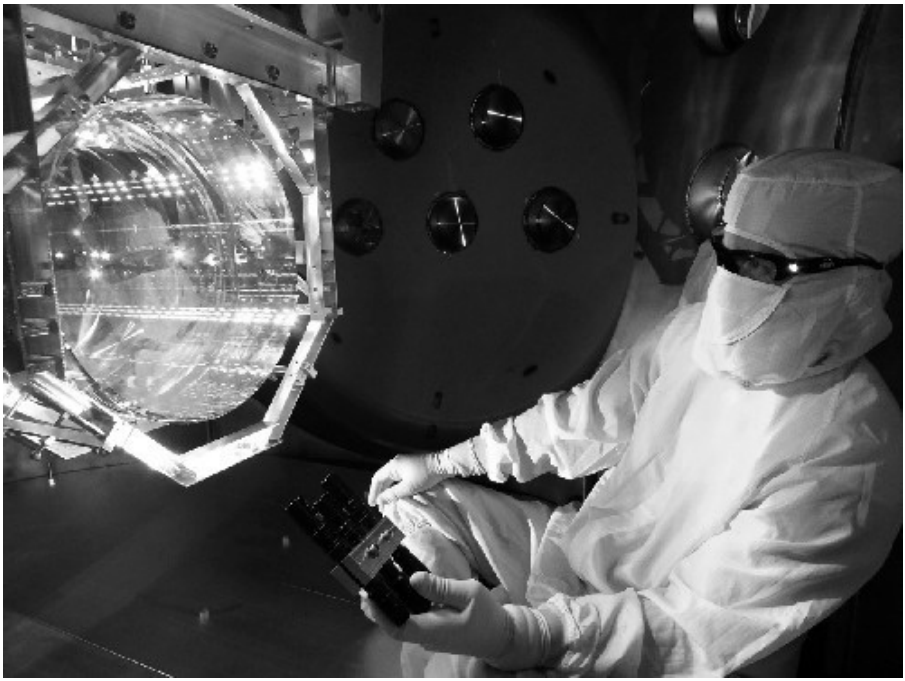
Por tanto, el primer gran éxito de una teoría cuántica de campos fue la *electrodinámica cuántica*, es decir, la generalización de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo al mundo subatómico. Tal era la confianza de los físicos tras esta hazaña, que Heisenberg y Pauli, dos de los fundadores de la mecánica cuántica, en su primer artículo sobre la electrodinámica cuántica, en 1929, escribieron que «puede realizarse la cuantización de la gravedad, que parece ser necesaria por causas físicas, sin ninguna dificultad nueva gracias a un formalismo análogo al empleado aquí». Estaban equivocados. Su error, subestimar el desafío que suponía aplicar la teoría cuántica a una teoría donde la geometría del espacio-tiempo es dinámica.

LIGO: EN BUSCA DE LAS ONDAS DEL TEJIDO DEL ESPACIO-TIEMPO

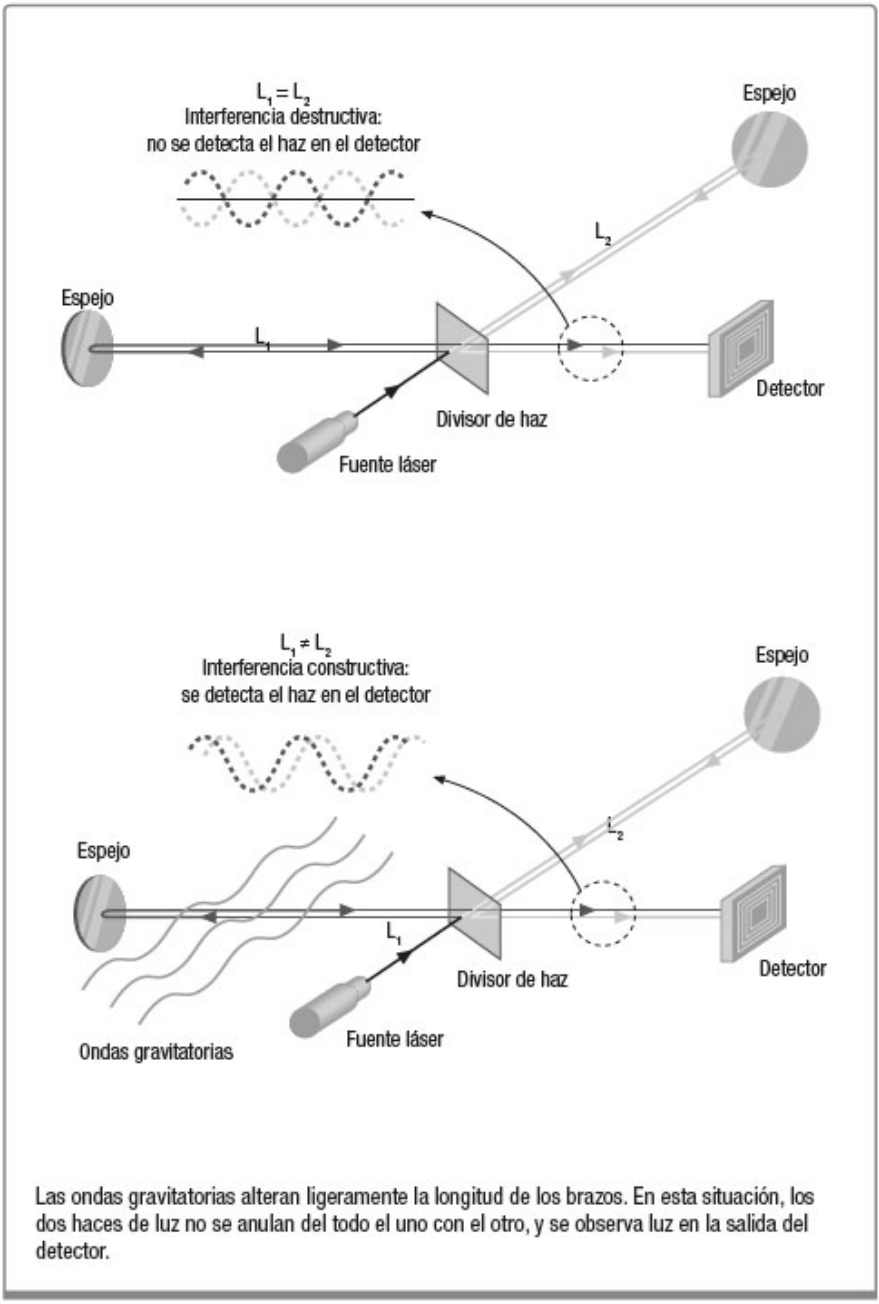
La colaboración científica LIGO representa el trabajo multidisciplinar de miles de científicos, ingenieros y técnicos a escala global. La propuesta para su construcción como instrumento para la detección de ondas gravitatorias fue realizada en la década de 1980 por los físicos Rainer Weiss, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), y Ronald Drever y Kip Thorne, del Instituto Tecnológico de California (Caltech).

Cómo funciona el detector Ligo

Hay dos observatorios LIGO, ubicados en Washington y en Luisiana (Estados Unidos), a unos 3000 km de distancia. En cada uno, un interferómetro con forma de L y brazos (L_1 y L_2) de 4 km de longitud, emplea luz láser descompuesta en dos haces que van y vienen de un brazo a otro (véanse las figuras). Los haces se usan para monitorizar la distancia entre unos espejos ubicados en los extremos de los brazos. Según la relatividad general, la distancia entre ellos cambiará de forma infinitesimal al pasar por el detector una onda gravitatoria. La sensibilidad de los detectores de LIGO permite observar una variación inferior a 10^{-19} m, ¡la diezmilésima parte del diámetro de un protón!



Un técnico inspecciona uno de los espejos de LIGO. La presencia de contaminación en cualquiera de sus componentes ópticos afectaría a su funcionamiento.



Las ondas gravitatorias alteran ligeramente la longitud de los brazos. En esta situación, los dos haces de luz no se anulan del todo el uno con el otro, y se observa luz en la salida del detector.

Heisenberg y Pauli tenían en mente atacar el problema de la gravedad cuántica considerando primero el caso de un campo gra-

vitatorio muy débil. En este caso, se puede pensar en las ondas gravitatorias como pequeñas alteraciones sobre una geometría fija. Si se deja caer una piedra sobre un estanque en un día tranquilo, se producen pequeñas olas que apenas alteran el carácter plano de la superficie del agua, superficie que se considera una geometría estática, de modo que las pequeñas olas provocadas por la piedra pueden verse como alteraciones moviéndose sobre una geometría fija. Análogamente, las ondas gravitatorias muy débiles pueden considerarse pequeñas alteraciones viajando sobre un espacio-tiempo estático.

Armados con las técnicas que habían desarrollado para el caso de la electrodinámica cuántica, donde el campo electromagnético cuántico se desplaza sobre una geometría fija, fueron capaces de describir en términos cuánticos las ondas gravitatorias libres, es decir, que viajan sin interactuar con nada más, ni siquiera entre ellas. El resultado fue que cada onda gravitatoria libre cuántica se podía interpretar en términos de una partícula, el *gravitón*, el análogo gravitatorio del fotón, onda electromagnética cuántica. Hasta aquí, miel sobre hojuelas. Pero había un problema: los fotones no interaccionan entre sí, porque son eléctricamente neutros (sí lo hacen con partículas cargadas, como el electrón o el protón). Las ondas gravitatorias, por el contrario, no son neutras respecto de la carga responsable de la interacción en la que median y, por tanto, sí interaccionan entre ellas. Por tanto, cuando Heisenberg y Pauli trataron de describir esta interacción entre gravitones, fracasaron. Estaban condenados a ello. En el momento en que consideramos la interacción entre dos gravitones, incluso si corresponden a ondas muy débiles, la imagen de aquellos viajando sobre una geometría

estática carece de sentido, dado que tal interacción cambia la geometría del espacio-tiempo.

Un pionero silenciado: la clave de la gravedad cuántica

El 18 de febrero de 1938 un pelotón de fusilamiento acababa con la vida de un reo en una prisión de Leningrado. Su nombre, Matvéi Petrovich Bronstein; su legado, ser la primera persona en comprender la profundidad del problema de la gravedad cuántica. Este físico soviético predijo «la eliminación de nuestros conceptos ordinarios de espacio y tiempo, sustituyéndolos por otras ideas mucho más profundas y nada evidentes».

Lo cierto es que solo una persona entendió el alcance del trabajo de Bronstein en aquellos días, el joven físico francés Jacques Solomon. Tristemente, seguiría el cruel final del soviético, quien fue arrestado la noche del 6 de agosto de 1937 por la NKVD (Comisariado Popular para Asuntos Internos), víctima de la locura estalinista. Por su parte, Solomon, unido a la Resistencia francesa, fue arrestado y ejecutado por la Gestapo el 23 de mayo de 1942. Dos pérdidas muy duras para la física.

Es muy enriquecedor analizar la manera en que se comprendió por primera vez el desafío de la gravedad cuántica. Para ello, recordemos que una medida no es más que la interacción entre el cuerpo que realiza la medida (ya sea un aparato de laboratorio o una partícula de prueba) y el sistema físico medido. Durante el transcurso de esta interacción, el cuerpo que mide experimenta un retroceso, que se cuantifica en su *momento lineal* (producto de la masa por la velocidad). Este retroceso será menor cuanto mayor sea la masa del cuerpo que realiza la medida, pues, según la ley de la inercia, costará más ponerlo en movimiento. Ahora bien, este retroceso solo es perceptible a escala subatómica, no en nuestra

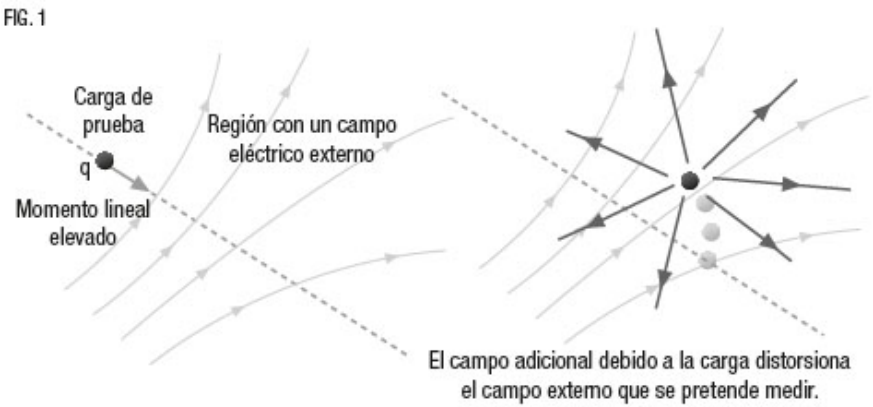
vida cotidiana: si colocamos una regla junto a una mesa para medir su longitud, no observaremos retroceso alguno de la regla, puesto que es ínfimo. Por su parte, si colocamos un electrón muy cerca de un protón, con objeto de estudiar la fuerza eléctrica de este último, nuestro electrón sí sufrirá un retroceso perceptible, ya que su masa es tan pequeña que se mueve fácilmente con el más mínimo impulso.

Todo comenzó con un error del gran físico soviético Lev Landau. Poco después de que Heisenberg hubiese introducido sus relaciones de indeterminación, el problema al que se enfrentaban los físicos teóricos era extender la teoría cuántica al campo electromagnético. En un artículo de 1931, firmado con el físico inglés de origen alemán Rudolf Peierls, Landau argumentó que la medida, con precisión arbitraria, de una componente del campo en un punto del espacio-tiempo exigía medir, con precisión máxima, la posición de la carga de prueba, lo que implicaba un valor muy alto en la indeterminación del momento lineal, según Heisenberg. Ahora bien, recordemos que, en general, un sistema cuántico se halla en una superposición. En este caso, tal indeterminación en el momento lineal se traduce en que, en la superposición de estados de nuestra carga de prueba, cada uno de estos estados corresponde a valores muy dispares del momento lineal. En particular, habrá estados con un momento lineal elevado. Esta disparidad en los valores del momento lineal se traduciría, tras la medida, en una indeterminación muy alta en el momento lineal de retroceso de la carga de prueba. En la superposición de estados, habrá algunos con un momento lineal de retroceso muy alto. Como resultado de ello, teniendo en cuenta que toda carga en movimiento genera un campo electromagnético, estos estados producirían un campo electro-

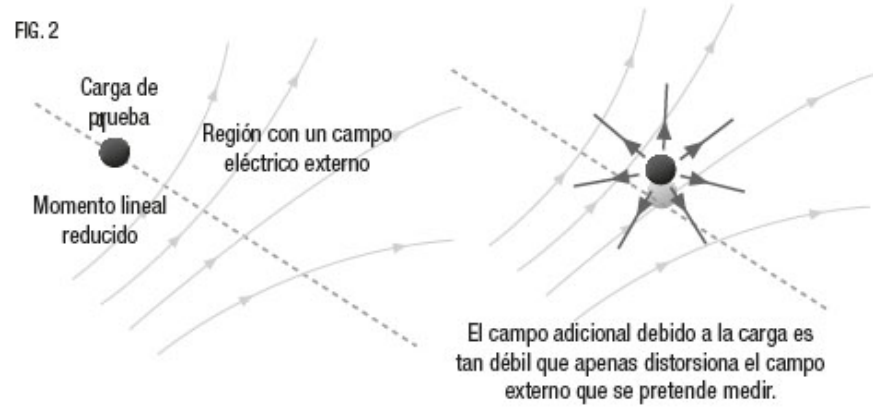
magnético adicional que distorsionaría el campo original que se pretende medir, como se ilustra en la figura 1.

El eminente físico danés y uno de los padres de la teoría cuántica, Niels Bohr, rechazó las conclusiones de Landau y Peierls cuando estos lo visitaron en Copenhague en febrero de 1931. Para demostrarlo, se reunió con el físico belga Léon Rosenfeld e iniciaron la investigación del asunto. Tras dos años de periplo conceptual, publicaron un artículo en 1933 en el que demostraban que en la versión cuántica del campo electromagnético las relaciones de indeterminación no evitan que se pueda medir, con precisión arbitraria, cualquier componente del campo. Su razonamiento, representado en la figura 2, es el siguiente: el problema de Landau-Peierls era el elevado momento lineal de retroceso de la carga de prueba, lo que generaba un campo que interfería de forma notable con el campo inicial que se deseaba medir. Ahora bien, según las relaciones de indeterminación, obtenían un momento lineal elevado porque habían considerado una carga *puntual*, es decir, un punto matemático de tamaño nulo (localización máxima). Pero la noción de partícula puntual (cargada o no) no es válida en la teoría clásica de campos. Lo que sí tiene sentido es realizar una medida sobre una región espacial *finita*, esto es, de tamaño no nulo. Por tanto, no se requiere una localización máxima de la carga de prueba, de modo que la incertidumbre en el momento lineal ya no tiene por qué ser elevada. Siguiendo el razonamiento anterior, tras la medida, al contrario que en el caso de Landau-Peierls, los distintos estados de la superposición ya no tendrán un momento lineal de retroceso alto. Si, además, la carga de prueba se elige con una masa lo suficientemente elevada (mayor inercia, más difícil de impulsar), el resultado neto es que su momento lineal de retroceso no

será importante, de modo que, en este caso, el campo adicional generado no interferirá significativamente con el campo inicial que se pretende medir.



El razonamiento de Landau-Peierls. Para medir la intensidad del campo eléctrico con la precisión deseada es necesario localizar al máximo la posición de q, es decir, tener una incertidumbre en su posición muy pequeña, lo que supone una incertidumbre muy alta en su momento lineal (izquierda). Esto implica que cada uno de los estados de la superposición posee valores muy diferentes del momento lineal. Como resultado, tras la medida tendremos una incertidumbre muy alta en el momento lineal de retroceso de la carga de prueba. En la superposición de estados, habrá algunos con un momento lineal de retroceso muy alto (representados por la carga difuminada de la derecha), que producirán un campo electromagnético adicional (flechas oscuras) que interferirá con el campo que se pretende medir.

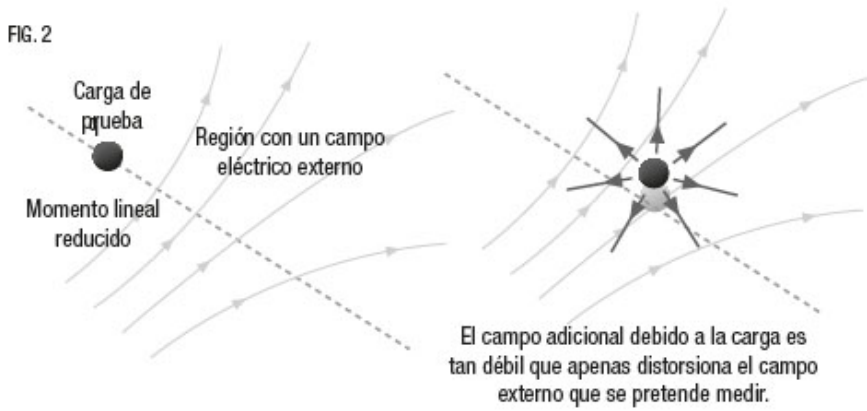


El razonamiento de Bohr-Rosenfeld. No es necesario localizar al máximo la carga de prueba q, de modo que la incertidumbre en su momento lineal puede ser moderada (izquierda). Ello, junto con una masa lo suficientemente elevada de q, implica que, tras la medida, ningún estado de la superposición tendrá un momento lineal de retroceso elevado (a la derecha, la menor distancia

recorrida por la carga difuminada comparada con la figura 1), por lo que el campo adicional generado (las flechas más oscuras) será moderado, y no interferirá significativamente con el campo inicial que se pretende medir.

Es aquí donde entra en escena Bronstein. Primero, repitió el análisis de Bohr-Rosenfeld, mejorando su argumento: para medir, con precisión arbitraria, cualquier componente del campo, Bohr-Rosenfeld, en su experimento teórico, tenían que gozar de la libertad de considerar valores indefinidamente altos tanto de la carga como de la masa del cuerpo de prueba. Lo primero era, realmente, una abstracción teórica, pues obviaban cualquier restricción empírica sobre el valor de la carga eléctrica. Con estas premisas, como hemos visto, Bohr-Rosenfeld invalidaban las conclusiones de Landau-Peierls.

Después, Bronstein analizó el problema tomando el campo gravitatorio en lugar del electromagnético. En este caso, advirtió una diferencia esencial entre ambos campos: el campo gravitatorio no permite la mencionada libertad, por dos motivos. Primero, la carga y la masa gravitatorias son la misma. Hablamos de carga, en sentido genérico, como la propiedad de un cuerpo por la cual es capaz de experimentar una fuerza. Así,



Para medir la intensidad de un campo gravitatorio externo, tomemos una canica de radio r_c, masa m_0, volumen V y densidad $d0$ (izquierda). Si aumentamos la masa, la canica alcanzará el

radio de su esfera de Schwarzschild, R_S (centro). Dado que este radio depende de la masa, el continuo incremento de esta hace que R_S sea mayor que el radio de la canica (derecha), de manera que esta queda oculta tras su R_S y perdemos la posibilidad de medir el campo gravitatorio externo.

solo un cuerpo con carga eléctrica, tenga masa o no, puede experimentar el electromagnetismo. Análogamente, para sentir la gravedad, un cuerpo ha de poseer *carga gravitatoria*, esto es, masa, independientemente de que tenga carga eléctrica. Este concepto generalizado de carga surgió tras el descubrimiento de las dos fuerzas nucleares, que requerían sendos nuevos conceptos de carga. Segundo, si se aumenta indefinidamente la masa del cuerpo de prueba (siguiendo a Bohr-Rosenfeld, para dotarlo de mayor inercia), a la vez que se mantiene confinado en la región donde se quiere medir el campo, aumentamos indefinidamente la densidad de dicho cuerpo. Imaginemos una canica de masa $m_{0,}$ densidad d_0 y radio r_c colocada en cierto lugar (figura 3). Añadámosle masa sin cesar, pero manteniendo constante el tamaño de la canica, esto es, sin variar su volumen. Estamos subiendo sin parar su densidad y, por ende, la gravitación producida por la canica. En esta situación, con masa m_1 y densidad $d_{1,}$ la relatividad general predice que, eventualmente, dicha canica alcanzará su *radio de Schwarzschild*, es decir, el radio de una esfera imaginaria tal que si toda la masa de la canica se concentra dentro de tal esfera, la velocidad de escape de la superficie de dicha esfera será la velocidad de la luz, puesto que la gravedad en la superficie será descomunal debido a la enorme densidad de la canica (la velocidad de escape es la velocidad mínima necesaria para escapar de la atracción gravitatoria de una superficie). Resulta que este radio de Schwarzschild aumenta con la masa m de la canica, por lo que llegará un momento, si seguimos aumentando su masa hasta m_2 y, por tanto, su densidad hasta $d_{2,}$ en el que el radio de Schwarzschild, R_S, será mayor que el

radio de la canica, r_c, de forma que nuestra canica quedará «oculta» tras su radio de Schwarzschild. Llegados a este punto, el observador no podrá realizar medida alguna del campo gravitatorio, ya que el cuerpo de prueba, nuestra canica, se ha ocultado tras su radio de Schwarzschild, una región inaccesible para todo observador externo a la esfera de Schwarzschild. Hemos alcanzado la génesis de un agujero negro, es decir, un objeto cuyo radio es menor que su correspondiente radio de Schwarzschild, de modo que dicho objeto «se perderá» tras su propio *horizonte de sucesos*, que juega el papel de la superficie de la esfera de Schwarzschild (recordemos que el horizonte de sucesos de un agujero negro es la superficie que separa su interior del exterior).

Bronstein escribió que «sin una revisión profunda de las nociones clásicas, parece difícil extender la teoría cuántica de la gravitación a las escalas más fundamentales». Su trabajo nos muestra que hemos de tener en cuenta la relación entre la gravitación y la geometría. Nos enseña que el argumento de Bohr-Rosenfeld, según el cual un campo cuántico puede definirse en regiones del espacio tan pequeñas como se desee (sin llegar al caso extremo de objeto puntual), falla en presencia de la gravitación. Necesitamos una auténtica teoría cuántica de la geometría. El espacio y el tiempo son aproximaciones de los verdaderos estados cuánticos del campo gravitatorio. Estos estados cuánticos no «viven sobre» el espacio-tiempo. «Son» los estados cuánticos «del» espacio-tiempo.

Desgraciadamente, Bronstein fue ejecutado. Perdidas sus ideas, la gran mayoría de los físicos teóricos se centraron en la construcción de la electrodinámica cuántica, completada a finales de la década de 1940. Esta proeza animó a algunos físicos a retomar el problema de la gravedad cuántica. De inmediato, se crearon los dos

grupos ya descritos, con ideas opuestas: el relativista, por un lado, y el de partículas, por otro. Uno siguió, sin saberlo, el camino de Bronstein de considerar seriamente el legado conceptual de Einstein; el otro continuó el trabajo de Heisenberg y Pauli. El primero desembocó, tras años de travesía por el desierto, en un conjunto de teorías, entre las que está la gravedad cuántica de bucles; el segundo, con no menos tormentas conceptuales, en las supercuerdas. La gravedad cuántica de bucles y otras teorías han hecho avances dramáticos desde su origen a finales de la década de 1980, realizando, por primera vez en la historia de la gravedad cuántica, predicciones claras que pueden ser comprobadas con las observaciones cosmológicas en curso, como veremos en capítulos posteriores. Por su parte, la teoría de supercuerdas, desde su primera revolución en 1984, no ha sido capaz de hacer predicciones concretas y falsables, es decir, que puedan contrastarse con las observaciones (salvo en modelos muy simplificados), básicamente por el enorme equipaje extra que acarrea, en forma de simetrías, partículas y dimensiones adicionales requeridas para que la teoría sea consistente.

Átomos
de espacio-tiempo

En el capítulo anterior hemos enfatizado la importancia de incorporar el legado conceptual de la relatividad general, es decir, la naturaleza dinámica del espacio-tiempo, en la búsqueda de la teoría cuántica de la gravedad. Y, por supuesto, también el legado de la mecánica cuántica, con sus objetos discretos y probabilísticos. Pero ocurre que, durante décadas, la actitud dominante de los físicos teóricos era ningunear la relatividad general, no la mecánica cuántica. El motivo, como hemos visto, es simple: los principios de la mecánica cuántica permitieron la construcción de las teorías que gobiernan las otras fuerzas fundamentales, culminando en el modelo estándar. Pero, como Bronstein advirtió, la gravedad es, sencillamente, una fuerza distinta.

En este capítulo describiremos con cierto detalle una de las teorías que tiene en cuenta tanto la relatividad general como la mecánica cuántica, la conocida como gravedad cuántica de bucles. En cierto sentido, el origen de esta teoría se remonta a 1967, cuando los físicos estadounidenses John Archibald Wheeler y Bryce DeWitt propusieron la ahora famosa ecuación de Wheeler- DeWitt, en su búsqueda de la gravedad cuántica según la visión del físico relativista, esto es, aquel que asumía el legado de Einstein. Sin embargo, pronto quedó patente la dificultad de hallar soluciones de la ecuación de Wheeler-DeWitt. Durante años, el sueño de Einstein permaneció estancado. El año 1982 vio el renacer de este ambicioso proyecto, cuando el físico Amitabha Sen inició la tarea de reformular la relatividad general de forma que se asemejase a las teorías de las otras tres fuerzas fundamentales. El trabajo de Sen lo culminó en 1986 el físico indio Abhay Ashtekar. Como ya se habían encontrado las teorías cuánticas del electromagnetismo y las dos fuerzas nucleares, el descubrimiento de Ashtekar-Sen llenó de en-

tusiasmo a los físicos que pasaban las noches en vela desde la aparición de la ecuación de Wheeler-DeWitt. Inmediatamente, entre 1987 y 1988, tres físicos, los estadounidenses Ted Jacobson y Lee Smolin y el italiano Carlo Rovelli, aplicaron con éxito las novedosas ideas de Ashtekar-Sen para encontrar ciertas soluciones exactas de la ecuación de Wheeler-DeWitt, lo que significó el arranque de la gravedad cuántica de bucles.

LA CURIOSA GEOMETRÍA DEL MICROCOSMOS

Recordemos la principal idea del capítulo anterior: el espacio y el tiempo que conocemos son meras aproximaciones de los verdaderos estados cuánticos de la gravitación, de forma que tales estados no viven sobre ningún espacio-tiempo, sino que son los estados cuánticos del propio espacio-tiempo.

Dada la íntima relación entre la geometría del espacio-tiempo y el campo gravitatorio, al abordar la cuestión de la gravedad cuántica nos enfrentamos al desafío de entender cuáles son las propiedades cuánticas de cantidades geométricas como áreas o volúmenes. Para ello, recalquemos las distintas maneras en las que se manifiesta la naturaleza cuántica de una magnitud física:

— La posible discretización o *cuantización* de dicha magnitud, esto es, que la magnitud no puede tomar cualquier valor. El conjunto de todos los valores que puede tomar una magnitud física se denomina *espectro*.

— La incertidumbre en el valor de ciertos pares de magnitudes, de acuerdo con las relaciones de indeterminación de Heisenberg.

— El carácter probabilístico de la evolución de la magnitud, al contrario que las ecuaciones deterministas de la física clásica.

Como primera toma de contacto con el problema, analicemos un sencillo ejemplo que ilustra el primer punto de los mencionados. Consideremos un trozo pequeño de espacio, por ejemplo uno con forma de tetraedro, no necesariamente regular. La geometría de este tetraedro viene dada por la longitud de sus lados, el área de sus caras, los ángulos entre vértices, etc. Y como geometría y campo gravitatorio son la misma cosa, estas cantidades geométricas dependen de dicho campo. Resulta que existen relaciones que ligan diferentes cantidades de la geometría del tetraedro, de modo que para caracterizar adecuadamente esta geometría hemos de tomar magnitudes que sean independientes. Por tanto, consideremos los vectores *normales*, es decir, perpendiculares, a las cuatro caras del tetraedro, como se indica en la figura 1.

Al pasar al ámbito cuántico, las magnitudes físicas se expresan en términos de *operadores*, que son una especie de funciones generalizadas. La propiedad más relevante para nosotros es que estos operadores no cumplen la familiar conmutatividad de la multiplicación. En la escuela aprendemos que «el orden de los factores no altera el producto». Pues bien, a estos operadores no les gusta este inocente dicho.

En el caso de nuestro tetraedro, la magnitud física que nos interesa es el campo gravitatorio, pues describe la geometría de aquel, incluyendo los vectores normales. Por tanto, en la teoría cuántica tenemos un campo gravitatorio cuántico descrito por un operador. Y la naturaleza cuántica de este operador se refleja, entre otras cosas, en el carácter discreto de su espectro. En particular, lo que esto significa es que los vectores normales, que dependen de este ope-

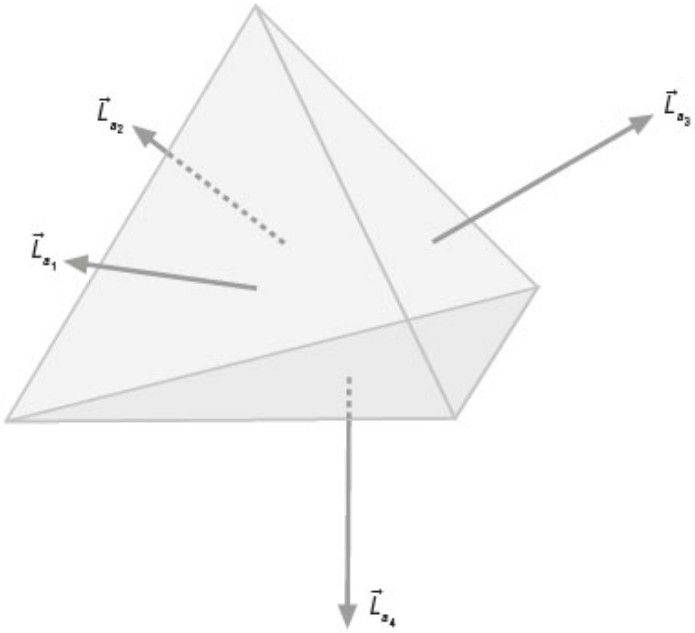
rador gravitatorio, definen una magnitud geométrica con un espectro discreto.

Para descubrir de qué magnitud hablamos, recordemos que una región bidimensional cualquiera se expresa en términos de dos vectores perpendiculares entre sí (figura 2). El área de esta región es el módulo («intensidad») del *producto vectorial* de tales vectores. El producto vectorial de dos vectores es un tercer vector perpendicular a ambos. Por tanto, este tercer vector ha de ser perpendicular a la región en cuestión.

En nuestro caso, la región es una cara cualquiera del tetraedro y el producto vectorial de los dos vectores no es más que el vector normal a esa cara. Por tanto, llegamos a la conclusión de que el área de cualquier cara del tetraedro es, simplemente, el módulo del vector normal a esa cara. En consecuencia, vemos que el área de las caras del tetraedro tiene un espectro discreto. Pero el resultado es general. No depende de tomar un tetraedro u otra forma geométrica concreta. Ni de considerar áreas: el resultado es igualmente válido para volúmenes. El motivo es el legado de Einstein: no existe ninguna noción de tamaño (longitud, área o volumen) que no dependa del propio campo gravitatorio, pues gravitación y geometría van de la mano. Por tanto, el tamaño de cualquier figura geométrica viene dado por el campo gravitatorio en ella. Y dado que en la teoría cuántica el campo gravitatorio se convierte en un operador con un espectro discreto, el tamaño de tal figura también tendrá un espectro discreto. En particular, hay un valor mínimo para el tamaño de cualquier figura geométrica: si seguimos con el ejemplo de los tetraedros, esto significa que existe un tetraedro elemental cuyo tamaño es el mínimo permitido por la teoría. Y no se puede cortar este tetraedro elemental por la mitad. El resultado

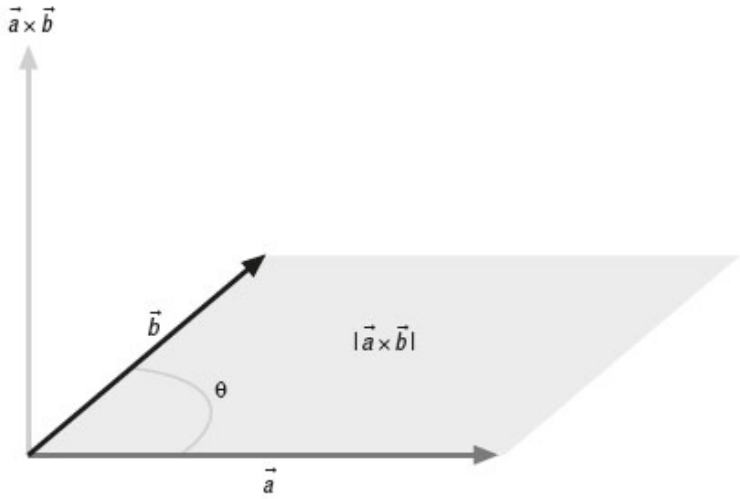
es que el propio espacio-tiempo adquiere una estructura «granular» formada por porciones individuales con tamaños dados por el campo gravitatorio en cada una de ellas. Este es el primer contacto con los átomos de espacio-tiempo del capítulo anterior. Análogamente al caso del electromagnetismo, donde la radiación electromagnética está compuesta por unidades elementales, los fotones (el fotón es el cuanto del campo electromagnético), en el caso del campo gravitatorio tenemos que la geometría de cualquier región se halla formada por unidades elementales, los gravitones. Y el gravitón es el cuanto del campo gravitatorio.

FIG. 1



El tetraedro y los vectores normales a sus caras, representados por las flechas. Estos vectores se simbolizan mediante $\vec{L}_{a_i}$, donde a_i se refiere a las caras ($i = 1, 2, 3, 4$).

FIG. 2



Producto vectorial. El área del paralelogramo formado por los vectores $\vec{a}$ y $\vec{b}$ es el módulo del producto vectorial $\vec{a} \times \vec{b}$ de ambos vectores.

Las implicaciones del carácter discreto del espacio-tiempo, tal y

como lo predice la gravedad cuántica, son dos. La primera es que la teoría no puede ser *local*. Una teoría de campos es local si es posible medir las magnitudes físicas en regiones arbitrariamente pequeñas del espacio, esto es, regiones de un tamaño tan pequeño como se desee. Hemos visto que la gravedad cuántica establece un límite inferior al tamaño de cualquier región. Por tanto, es una teoría no local.

La segunda consecuencia es la existencia de una cota superior para las interacciones a energías muy altas, esto es, una cota inferior para distancias muy pequeñas. En el modelo estándar de la física de partículas, que describe el resto de las interacciones fundamentales, el valor de una magnitud depende de la escala espacial a la que se mide dicho valor. Esta dependencia se describe mediante una técnica conocida como *renormalización*. Pues bien, al analizar el valor de una magnitud dada a distancias cada vez más bajas, obtenemos valores infinitos para ciertas magnitudes, como la masa, algo que no tiene ningún sentido físico. Es un síntoma de que algo falla en el proceso de la renormalización. La práctica habitual es asumir una cota inferior para las escalas que se quieren considerar, de modo que se eliminan los infinitos. Pero esto no es muy satisfactorio, pues estamos poniendo a mano tal cota inferior. Lo deseable es que esta cota emerja de la teoría. Este es el caso en la gravedad cuántica de bucles: la existencia de una longitud mínima, la longitud de Planck, implica la existencia de una escala máxima de energías, la energía de Planck. Gracias a esta cota «natural», no metida con calzador, no aparecen infinitos al calcular los valores de las magnitudes físicas.

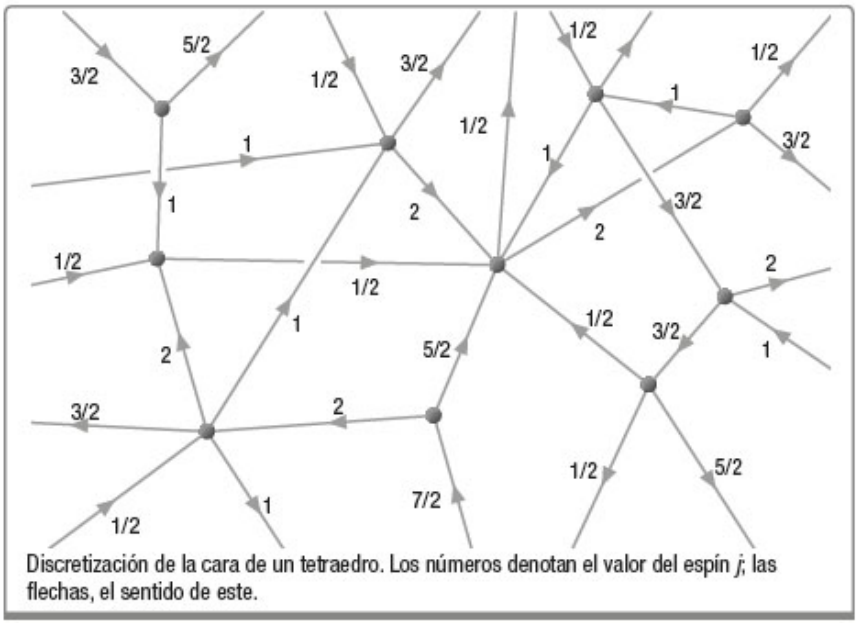
TETRAEDROS Y MOMENTO ANGULAR

La geometría de un tetraedro viene descrita por los vectores normales a sus caras, $\vec{L}_a$, salvo

rotaciones: si giramos el tetraedro en cualquier dirección, tales vectores rotarán también para seguir siendo normales a las caras, pero el *módulo* será el mismo. Esto no es más que la simetría rotacional del tetraedro: da igualla dirección de los vectores $\vec{L}_{\blacksquare}$, el tetraedro es el mismo. Pues bien, existe una magnitud física íntimamente ligada a la simetría rotacional, el *momento angular*, que se define como el producto vectorial de la posición y el momento lineal, y es una medida de la cantidad de *inercia rotacional* de un objeto, es decir, de cuánto cuesta frenar un objeto en rotación. La propiedad más importante del momento angular de un sistema es que permanece constante si tal sistema posee simetría rotacional. Ya que ambos están relacionados con la simetría rotacional, el mo mento angular y los vectores $\vec{L}_{\blacksquare}$ tienen propiedades similares. Gracias a ello, es posible usar la no conmutatividad del momento angular para hallar la correspon diente del vector normal a una cara dada y, de ahí, el valor del área de dicha cara: $A = \ell_0^2 \sqrt{j(j+1)}, j = 0,\ 1/2,\ 1,\ 3/2,\ 2,\ \ldots,$ donde *j* es el valor del espín y

$$\ell_0^2 = 8\pi\gamma\ell_P^2 = \gamma\frac{8\pi G\hbar}{c^3},$$

donde l_P es la longitud de Planck y γ es el parámetro de Barbero-Immirzi, en honor del físico español Fernando Barbero y el italiano Giorgio Immirzi.



Discretización de la cara de un tetraedro. Los números denotan el valor del espín *j*; las flechas, el sentido de este.

La existencia de una escala mínima otorga a la gravedad cuánti-

ca un carácter universal, análogo a lo que sucede con la relatividad especial y la mecánica cuántica. La relatividad especial se puede considerar como el descubrimiento de la existencia de una velocidad máxima: la velocidad de la luz en el vacío. Por su parte, la mecánica cuántica puede verse como el descubrimiento de la existencia de una acción mínima en todas las interacciones físicas: la constante de Planck. Del mismo modo, la gravedad cuántica supone el descubrimiento de una longitud mínima a la escala de Planck, lo que supone un carácter finito y discreto de la naturaleza a las escalas más fundamentales.

Los tetraedros elementales se difuminan

Después de haber visto que el espacio-tiempo está formado por «átomos», pasemos ahora a estudiar el segundo punto de los tres citados al comienzo del apartado: la incertidumbre en los valores del tamaño de una figura geométrica cualquiera. Por simplicidad, sigamos con nuestros tetraedros. La pregunta que nos hacemos es la siguiente: ¿la forma del estado cuántico del campo gravitatorio es realmente un tetraedro? Es cierto que empezamos nuestra discusión tomando tetraedros como porciones de una determinada región. Pero esto es en el caso clásico. Veamos si se cumple lo mismo en el caso cuántico.

La geometría de un tetraedro clásico viene determinada totalmente por seis números, por ejemplo, las longitudes de sus lados. Sin embargo, en el caso cuántico, solo necesitamos cinco números para definir el estado del tetraedro: las cuatro áreas (esencialmente, los cuatro vectores normales a las caras) y el volumen, que fija el tamaño del tetraedro. ¿Qué ha pasado con el sexto número? El principio de incertidumbre de Heisenberg no nos permite saber con precisión el valor de los seis números clásicos, solo de cinco:

las cuatro áreas y el volumen. El sexto número se vuelve «difuso». Como resultado de ello, no es posible medir con precisión arbitraria todas las magnitudes geométricas de una región dada, como longitudes, áreas o ángulos, debido al carácter difuso del sexto número. Así, a la escala de Planck, donde los efectos cuánticos de la gravitación son relevantes, la geometría se vuelve difusa.

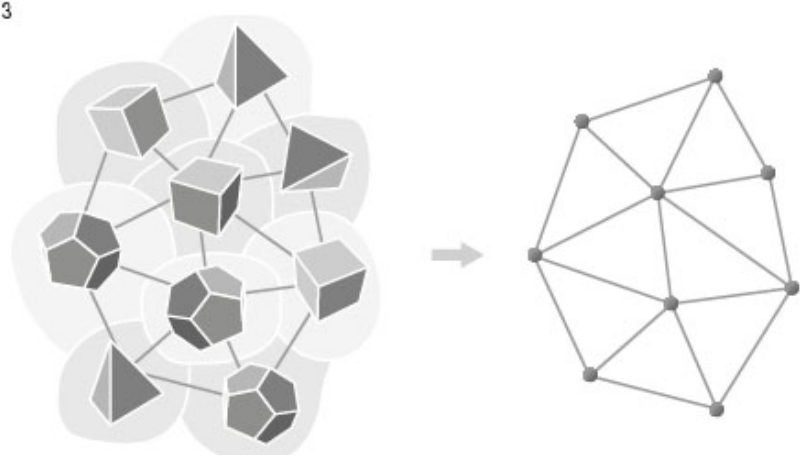
La ausencia de los conceptos convencionales de espacio y tiempo en la teoría cuántica de la gravedad exige un replanteamiento de los cimientos de la física. Las teorías de Newton y Maxwell, la relatividad especial y la mecánica cuántica, todas se refieren a la evolución de un sistema físico con el tiempo. Pero en gravedad cuántica no hay tiempo, ni espacio. Enfaticemos una vez más este hecho crucial: la gravedad cuántica no es la física del campo gravitatorio sobre el espacio-tiempo, es la descripción de los campos cuánticos que forman el espacio-tiempo mismo.

Bienvenida a los famosos «bucles»

En las páginas anteriores hemos analizado la geometría cuántica de una pequeña región de espacio (por simplicidad, un tetraedro). Obviamente, esta visión es muy simplista. En particular, ¿cómo describimos una región con curvatura? El modo de verlo es pensar que una región curva se puede entender como una secuencia de pequeñas porciones «pegadas» para formar la región curva, de tal manera que dicha curvatura emerja como resultado de este pegado. Estas porciones interconectadas se pueden representar mediante un *grafo*, que no es más que un conjunto de puntos o *nodos* conectados mediante líneas, como se muestra en la figura 3. En este símil, cada porción de espacio-tiempo es un nodo, y las líneas ilustran la relación causal entre porciones adyacentes. Tendremos mucho más que decir sobre estos grafos cuando estudiemos los esta-

dos cuánticos de la gravedad cuántica con algo más de detalle. Por ahora, baste decir que los «bucles» de la gravedad cuántica de bucles se refieren a los bucles formados por secuencias cerradas de líneas en un grafo, como se aprecia en la figura.

FIG. 3



A la izquierda se muestra un conjunto de diversos poliedros cuánticos adyacentes, y a la derecha se representa el grafo asociado a tales poliedros. Las líneas que unen los nodos denotan longitudes con un espectro discreto de posibles valores, en particular, la longitud de Planck o mínima. Estas son las líneas de Faraday de la gravedad cuántica de bucles.

Análogamente al caso electromagnético, donde Faraday introdujo el concepto de *línea de fuerza* para representar la distribución del campo electromagnético, en el caso de un grafo, sus líneas individuales se pueden concebir como las líneas de Faraday discretas del campo gravitatorio. La idea subyacente a la gravedad cuántica de bucles es que el carácter discreto impuesto por la teoría cuántica hace que tales líneas sean discretas. Dado que el campo gravitatorio es el espacio-tiempo, sus líneas de fuerza discretas no se hallan en el espacio-tiempo, sino que conforman la textura del propio espacio-tiempo.

En el apartado anterior hemos estudiado brevemente la geometría cuántica de una región de espacio-tiempo, ilustrada con nuestro tetraedro. La consecuencia natural es que dicha geometría se vuelve discreta, con sus átomos de espacio-tiempo o líneas discretas de fuerza en el contexto de un grafo. Este grafo es la herramienta principal para describir la gravedad cuántica: los nodos representan estados cuánticos del espacio-tiempo, mientras que las líneas indican las relaciones entre nodos vecinos.

La física de partículas en el retículo

Como preámbulo para la discretización de la relatividad general, consideraremos primero el caso de la cromodinámica cuántica, la teoría que describe la interacción de *color* entre quarks y gluones dentro de los hadrones (partículas que sienten la interacción fuerte, como el protón y el neutrón). El núcleo atómico está formado por partículas llamadas nucleones. Hay dos tipos, protones y neutrones. Todo núcleo tiene al menos un protón, y todos tienen neutrones salvo el átomo de hidrógeno «normal», cuyo núcleo solo tiene un protón. No obstante, existen otras versiones del hidrógeno que sí tienen neutrones en su núcleo, pero siempre con un único protón. Estas versiones se denominan *isótopos*. En el caso del hidrógeno, tenemos dos isótopos: el deuterio, con un protón y un neutrón, y el tritio, con un protón y dos neutrones. Resulta que los nucleones, a su vez, también están formados por partículas más pequeñas: los quarks y los gluones, cuya misión es pegar los quarks. La interacción que actúa sobre los quarks y los gluones dentro de protones y neutrones se llama interacción de color (aunque no tiene nada que ver con el concepto normal de «color»). El color es una propiedad cuántica de los quarks y los gluones. Por este motivo, la teoría que estudia la interacción de color se llama cromodi-

námica cuántica (el prefijo *cromo–* viene del griego *chróma,* que significa «color»). Esta interacción de color entre quarks y gluones se manifiesta en una fuerza a escala de los protones y los neutrones, la llamada fuerza nuclear fuerte, que explica las interacciones entre los protones y neutrones de manera efectiva, esto es, como si no estuviesen compuestos por quarks y gluones. Resumiendo: la interacción de color actúa sobre quarks y gluones, mientras que la fuerza nuclear fuerte es el «remanente» de aquella cuando actúa sobre protones y neutrones vistos como partículas sin estructura interna.

La interacción de color exhibe un comportamiento curioso. Mientras que la gravitación y el electromagnetismo decrecen con la distancia (entre masas, en el primer caso; entre cargas, en el segundo), la interacción de color crece con la distancia entre quarks. Esta es la causa del fenómeno conocido como *confinamiento*, según el cual no es posible tener quarks libres, pues cuando se alejan entre sí, la interacción de color se hace tan intensa que los quarks apenas se separan. Además, esta interacción entre quarks es la responsable de la estabilidad nuclear, esto es, del hecho de que los protones no se repelan entre sí dentro del núcleo atómico, como cabría esperar si tenemos en cuenta que las cargas del mismo signo se repelen. La clave es que la interacción fuerte no solo es atractiva, sino más intensa que el electromagnetismo. De este modo, los protones se mantienen unidos en el núcleo atómico. Si no fuese así, no existirían moléculas, ni la vida tal como la conocemos.

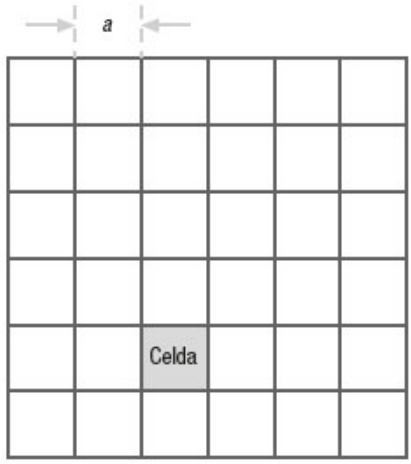
Para hacer cálculos en este «sector intenso» de la teoría, el confinamiento de los quarks, los físicos recurren a una aproximación: discretizan el campo responsable de la interacción fuerte, de modo que solo tienen que lidiar con un número finito de valores de dicho

campo, algo más simple desde un punto de vista computacional (recordemos que un campo es una magnitud que se extiende por todo el espacio-tiempo, por lo que posee infinitos valores).

La razón de estudiar primero el caso de la cromodinámica cuántica es que es más «sencilla» que la gravedad. ¿Por qué? De nuevo la respuesta se halla en el legado de Einstein: la cromodinámica cuántica, al contrario que la relatividad general, sí puede definirse sobre un espacio-tiempo fijo e inmutable (recordemos el símil teatral del capítulo anterior). Esto simplifica bastante el asunto.

Para verlo, pensemos en una red cúbica fija con vértices conectados por lados en el espacio-tiempo, como muestra la figura 4. La longitud de los lados del retículo sirve para medir el desplazamiento de los quarks. De manera equivalente, para calcular la evolución temporal de un grupo de quarks, se introduce un nuevo parámetro que indica el «tamaño del paso temporal» desde un instante hasta otro, dividido por el número de pasos en el retículo. Es importante recalcar que estos parámetros son fijos: el físico simplemente les va dando valores para estudiar diferentes situaciones. Dado que esta discretización es solo una aproximación, los valores de las magnitudes físicas únicamente tienen sentido cuando el número de vértices se hace muy grande y la longitud de los lados del retículo se hace muy pequeña. El resultado de ambos límites nos lleva de un retículo a un objeto continuo. El mensaje que debe quedar claro es que, en teorías donde el espacio-tiempo es fijo, el continuo se obtiene mediante dos límites distintos.

FIG. 4



La red cúbica tiene *N* vértices conectando un conjunto de celdas, cuadrados de lado *a*. El camino entre sucesivos vértices marca la «trayectoria» de los quarks y los gluones.

Intermezzo: polígonos, poliedros y politopos mágicos

Antes de abordar la discretización de la relatividad general, resulta muy ilustrativo analizar con algo de detalle el concepto fundamental en dicho proceso de discretización. Nos referimos al *símplice*.

Para empezar, recordemos algunos conceptos. Un polígono es una figura acotada por segmentos. Los polígonos viven en un espacio bidimensional. El caso más simple es el triángulo. Un poliedro es una figura acotada por polígonos regulares, es decir, con todos sus lados iguales. Los poliedros viven en un espacio tridimensional. El caso más conocido es el cubo. Siguiendo el patrón, se define un *politopo* como la figura acotada por poliedros regulares. Los politopos son la extensión de los polígonos y los poliedros a dimensiones superiores.

Al contrario del número ilimitado de polígonos regulares, el número de poliedros regulares es muy reducido. Los geómetras griegos no solo los encontraron todos (tetraedro, cubo, octaedro, dode-

caedro e icosaedro), sino que también demostraron que no había ninguno más.

Pasemos a visualizar la idea de símplice. Tres puntos en un plano, que no estén sobre una línea, determinan un triángulo, o 2-símplice. Análogamente, cuatro puntos en el espacio, que no estén en el mismo plano, determinan un tetraedro, o 3-símplice. En general, un n-símplice es la figura en un espacio n-dimensional que contiene n+1 puntos que no estén sobre un espacio de dimensión menor. En el caso n=2, el triángulo es la figura en un espacio bidimensional, un plano, que contiene tres puntos que no se hallan sobre un espacio unidimensional, una línea. De la misma forma, el tetraedro, n=3, es la figura en un espacio tridimensional que contiene cuatro puntos que no están sobre un espacio bidimensional, un plano. Si analizamos el número de lados, triángulos y otros símplices en un n-símplice, descubrimos un patrón que aparece constantemente en álgebra y probabilidad. El estudio de tales patrones es uno de los aspectos más fascinantes de las matemáticas.

Si seguimos el proceso de dibujar símplices, podemos contar el número de lados. Empezamos con un punto. Elegimos un segundo punto y dibujamos la línea que los une, obteniendo un lado. A continuación, elegimos un tercer punto, que no esté sobre la línea de los dos primeros, y lo unimos con estos, de modo que tenemos ahora tres lados. El siguiente paso es escoger un nuevo punto que no esté sobre ninguna de las tres líneas formadas por los lados ya construidos. Uniendo este cuarto punto con los tres anteriores, obtenemos un total de seis lados. La figura resultante es un 3-símplice o tetraedro.

Continuemos el proceso para dibujar la imagen de la figura más sencilla determinada por 5 puntos, el 4-símplice. Este ejemplo es

importante porque la discretización de la relatividad general se basa en 4-símplices. Ya tenemos las seis líneas que forman los seis lados del 3-símplice. Elijamos un quinto punto que no esté sobre ninguna de estas seis líneas y unámoslo a los cuatro puntos anteriores, de modo que tenemos un total de diez lados. Podemos imaginar que este quinto punto se extiende a la cuarta dimensión, y que lo que observamos son las sombras o proyecciones de los segmentos que unen dicho quinto punto con los cuatro puntos del 3-símplice. Si organizamos los resultados en una tabla, vemos un patrón:

	Dimensión del símplice					
	0	1	2	3	4	5
Número de vértices	1	2	3	4	5	6
Número de lados	0	1	3	6	10	15

El número de lados en cualquier etapa del proceso es la suma de todos los números de vértices menores que el número en esa etapa. Se puede ver fácilmente en nuestro proceso de dibujo, ya que cada nuevo punto está unido a todos los puntos anteriores.

El estudio de las posibles combinaciones ofrece una manera diferente, y más potente, de hallar el número de lados de un símplice. Dado que cada vértice se conecta con todos los demás, el número de lados será igual al número de pares de vértices, es decir, el número de combinaciones de un cierto número de vértices tomadas de dos en dos. Si tenemos $n + 1$ vértices, entonces hay $n + 1$ elecciones para el primer elemento del par y n vértices para el segundo elemento. Si multiplicamos estos números, tenemos $(n + 1) \times$

n, pero como así estamos contando dos veces cada lado, el número total de lados es la mitad.

Lo siguiente en dificultad sería contar el número de triángulos distintos en cada etapa. El 3-símplice o tetraedro tiene cuatro triángulos (sus caras). El 4-símplice tiene estos cuatro más otros seis que resultan de unir los seis lados del 3-símplice con el nuevo vértice, dando un total de diez triángulos para el 4-símplice. Podemos extender la tabla anterior:

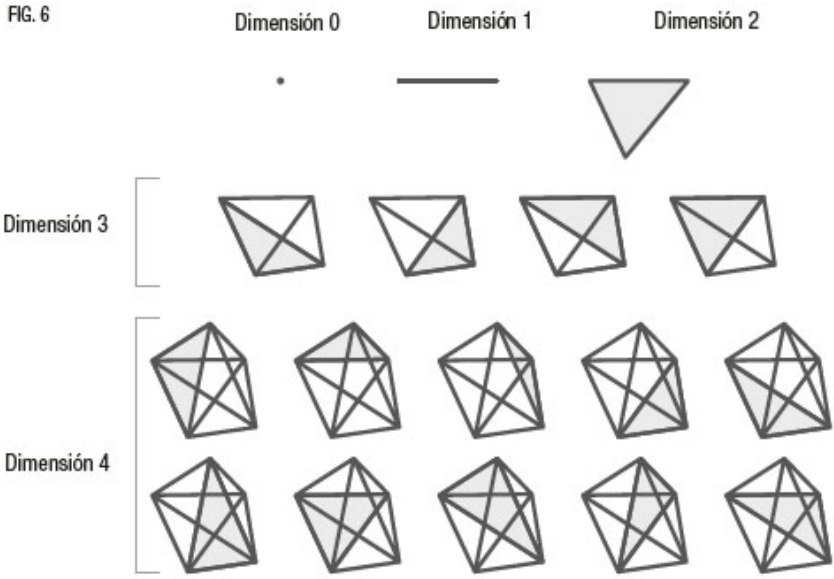
	Dimensión del símplice					
	0	1	2	3	4	5
Número de lados	0	1	3	6	10	15
Número de triángulos	0	0	1	4	10	¿?

En cada etapa, el número de triángulos formados por un número dado de puntos es la suma del número anterior de triángulos y del número anterior de lados. Así, el número de triángulos en un 5-símplice determinado por seis puntos es 10 + 10 = 20. En la figura 5 se ilustran los símplices en las primeras cinco dimensiones. Por su parte, la figura 6 muestra las caras triangulares de los símplices en las primeras cinco dimensiones.

FIG. 5

De izquierda a derecha: el 0-símplice o punto, el 1-símplice o segmento, el 2-símplice o triángulo, el 3-símplice o tetraedro y el 4-símplice. El 4-símplice y los siguientes no se pueden representar en nuestro espacio tridimensional, menos aún en el plano de una página.

FIG. 6



Las caras triangulares de los símplices en las primeras cinco dimensiones.

Einstein y su relatividad general en el retículo... o casi

Tras este paréntesis para familiarizarnos con el concepto de símplice, volvamos al asunto de la discretización de la relatividad general. En 1961, el físico italiano Tullio Regge introdujo un método

muy elegante de discretizar la relatividad general, que es la base de dos teorías diferentes de la gravedad cuántica: la gravedad cuántica de bucles, que es la considerada en este libro, y la llamada teoría de las triangulaciones dinámicas causales.

Como hemos indicado al comienzo del apartado anterior, el concepto principal en el proceso de discretización es el de símplice. Se denomina *espacio de Regge* en d dimensiones el formado al pegar d-símplices a lo largo de los correspondientes $(d-1)$-símplices que hacen de frontera. Por ejemplo, en el caso d=2, podemos obtener una superficie (en general, curva) pegando 2-símplices, esto es, triángulos, a lo largo de los 1-símplices (segmentos) que acotan tales triángulos, y estos 1-símplices, a su vez, se unen en 0-símplices (puntos). Análogamente, en d=3, podemos trocear el espacio en 3-símplices (tetraedros) y pegarlos a lo largo de 2-símplices (triángulos). Finalmente, en el caso de relevancia física, d=4, podemos trocear el espacio-tiempo en 4-símplices y pegarlos a lo largo de 3-símplices (tetraedros). Estas estructuras geométricas discretas que al pegarlas dan lugar al espacio continuo se denominan *triangulaciones*.

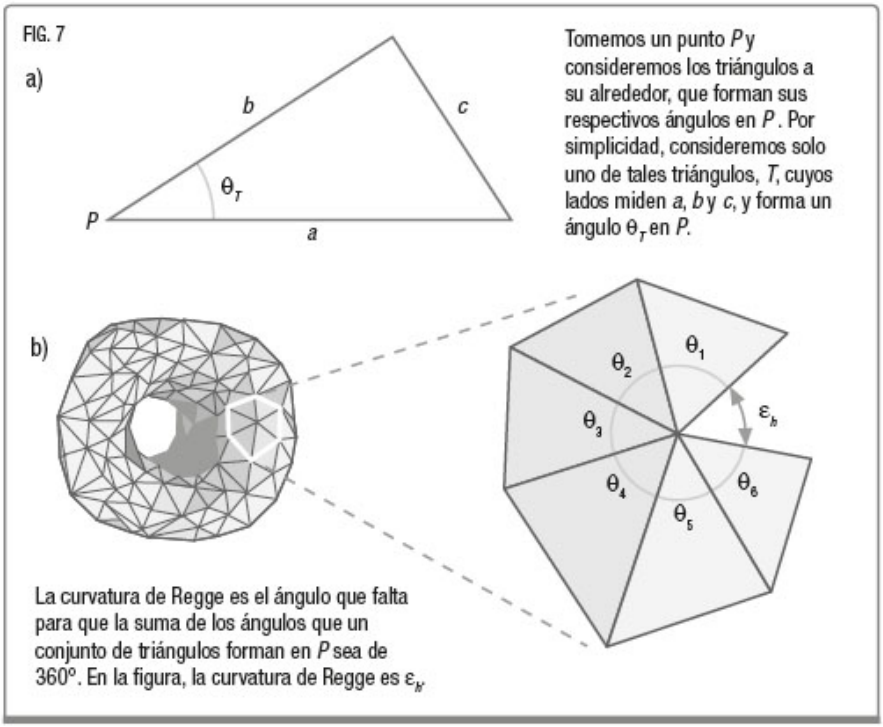
Si nos paramos a reflexionar, nos daremos cuenta de que el proceso de pegar d-símplices planos (esto es, sin curvatura) puede generar curvatura en los $(d-2)$-símplices. Así, si $d = 2$, podemos pegar cuatro triángulos equiláteros como en la frontera de un tetraedro, de forma que se genera curvatura en los vértices (0-símplices) de tal tetraedro. Igualmente, en $d = 3$, podemos pegar varios tetraedros alrededor de un segmento (1-símplice) común, obteniendo un espacio plano en todos los puntos excepto en este segmento. Finalmente, en $d = 4$, podemos pegar varios 4-símplices alrededor de un

triángulo (2-símplice) común, obteniendo un espacio-tiempo plano en todos los puntos excepto en dicho triángulo.

En la tabla siguiente aparece destacado el símplice que conlleva la curvatura. Esta es la base para aproximar espacios curvos arbitrarios mediante triangulaciones.

TRIANGULACIONES					
2D			triángulo	segmento	**punto**
3D		tetraedro	triángulo	**segmento**	punto
4D	4-símplice	tetraedro	**triángulo**	segmento	punto

El cálculo de Regge consiste en aproximar la relatividad general por medio de espacios de Regge. Para ello, necesitamos una noción de curvatura de un espacio de Regge, que converja de manera apropiada a la curvatura que aparece en la relatividad general. Ilustremos el elegante concepto de curvatura de Regge en el caso más simple, $d = 2$, mostrado en la figura 7 a). Tomemos un punto P de la triangulación. Alrededor de este punto hay varios triángulos, que forman varios ángulos en él. Estos ángulos se pueden calcular fácilmente conociendo las longitudes de los lados de los triángulos. Sabemos que si los ángulos que un conjunto de triángulos forman en un punto suman 360°, el espacio es plano (caso de la geometría euclídea). Si no es así, entonces existe curvatura. Se define la *curvatura de Regge* en un punto como el ángulo que falta para que los ángulos que un conjunto de triángulos forman en ese punto sumen 360°, como se indica en la figura 7 b). Con esta definición, esta curvatura de Regge se conoce como *ángulo de déficit*. En el caso que nos interesa, $d = 4$, la curvatura de Regge sigue siendo un ángulo de déficit, pero ahora los ángulos relevantes no son alrededor de un punto, sino de 2-símplices, esto es, triángulos.



La característica más notable de esta construcción es que las ecuaciones que se obtienen convergen en las ecuaciones de Einstein de la relatividad general cuando el espacio de Regge tiende a un espacio de Riemann (la generalización al caso curvo del espacio euclídeo), esto es, cuando refinamos más y más la triangulación y tomamos infinitos tetraedros.

A modo de resumen, recapitulemos. En el caso de la interacción fuerte, la obtención del caso físico, es decir, el continuo, requiere tomar dos límites: del número de vértices a infinito y del espaciado reticular a cero. Por el contrario, en el caso de la relatividad general, descrita mediante el cálculo de Regge, el límite continuo solo necesita refinar la triangulación para aproximar mejor el espacio-tiempo continuo. Este refinamiento es análogo al caso de tomar infinitos vértices en la interacción fuerte. La diferencia es que el cál-

culo de Regge no tiene ningún parámetro análogo al espaciado reticular que haya que llevar a cero. La razón, una vez más, hay que buscarla en la propiedad que diferencia a la gravitación del resto de las fuerzas: dado que las longitudes de los segmentos de la triangulación en el cálculo de Regge son las propias variables dinámicas que definen la teoría, no tiene sentido hacerlas fijas ni llevarlas a ningún valor límite.

A pesar de la discretización tan ingeniosa y exitosa que Regge concibió para la relatividad general, hay un par de problemas a la hora de considerar la teoría cuántica. El primero es que el espacio de Regge está basado en la *métrica* de un espacio, una magnitud que, como su nombre indica, nos permite medir sobre dicho espacio; en concreto, sirve para definir distancias. Sin embargo, se sabe que los fermiones (partículas con espín semientero), que incluyen toda la materia conocida, no se pueden acoplar a la métrica (por ahora, baste decir que el espín es una propiedad relacionada con «giros» de las partículas elementales alrededor de sus ejes). Los fermiones vienen descritos por un objeto llamado *espinor*, al que volveremos brevemente al final del capítulo. Lo único que nos concierne aquí es que la métrica y el espinor se sienten incómodos juntos. El segundo problema es que los segmentos de una triangulación de Regge están sujetos a las desigualdades triangulares: un segmento que une dos puntos P y Q no puede ser más largo que la suma de los segmentos que unen P y R, por un lado, y Q y R, por otro. Y dado que las variables dinámicas son las longitudes de estos segmentos, el hecho de que hayan de satisfacer estas desigualdades complica bastante el problema de la cuantización de la teoría.

El primer problema, el acoplamiento a fermiones, se resuelve sustituyendo la métrica por la *tétrada*, que no es más que un con-

junto de cuatro campos vectoriales. Un campo vectorial es aquel campo que en cada punto del espacio-tiempo viene dado por un vector, es decir, una magnitud con módulo o intensidad y una dirección y un sentido. Lo que nos interesa saber es que esta tétrada sí se puede acoplar a los fermiones.

El segundo problema, el hecho de tener desigualdades para los segmentos de la triangulación, se solventa si la discretización de la relatividad general se describe en términos de *2-complejos*, cuyo significado resultará claro en unos instantes. Pero antes conviene hacer una breve pausa para familiarizarnos con el concepto clave detrás de estos 2-complejos, a saber, la noción del *dual* de una triangulación.

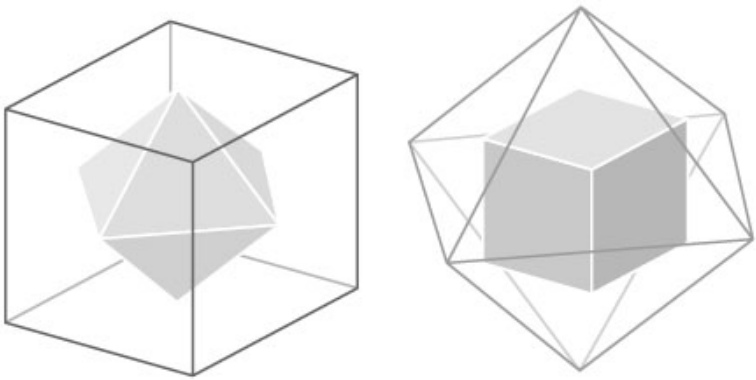
Intermezzo : el dual de una triangulación

Una de las maneras más elegantes de dibujar poliedros regulares es mediante el principio de dualidad. Por ejemplo, un cubo y un octaedro están muy relacionados entre sí. Los centros de las seis caras cuadradas de un cubo son los vértices de un octaedro (figura 8). Se dice que el octaedro es el dual del cubo. Y viceversa, los centros de las ocho caras triangulares de un octaedro son los vértices de un cubo, así que el cubo es el dual del octaedro.

¿Qué sucede si construimos los duales del resto de los poliedros regulares? Para un tetraedro, los centros de las cuatro caras triangulares forman otro tetraedro. Decimos que el tetraedro es autodual (figura 9, izquierda). Más complicado resulta hallar la figura cuyos vértices son los centros de los 20 triángulos equiláteros de un icosaedro. Alrededor de cada vértice del icosaedro hay cinco triángulos. Si ahora unimos los centros de estos triángulos, la figura que obtenemos es un pentágono regular. Dado que el icosaedro presenta 12 vértices, tenemos una distribución de 10 pentágonos

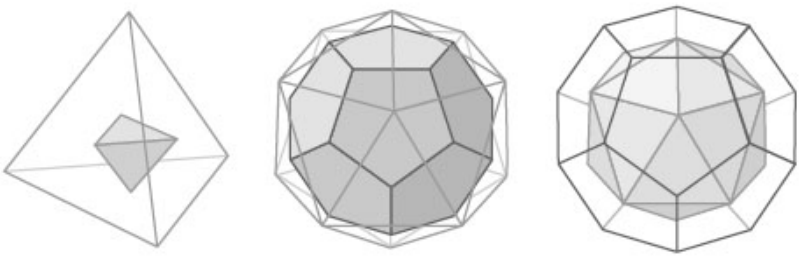
regulares, tres en cada vértice. El objeto que resulta es el quinto poliedro regular: el dodecaedro. Inversamente, el dodecaedro tiene 20 vértices, cada uno con tres pentágonos regulares. Los centros de estos pentágonos dan 20 triángulos equiláteros, formando un icosaedro. Por tanto, el dodecaedro y el icosaedro son duales entre sí, como se aprecia en la figura 9.

FIG. 8



Cubo-octaedro como par dual. Los centros de las seis caras cuadradas de un cubo son los vértices de un octaedro. Y viceversa, los centros de las ocho caras triangulares de un octaedro son los vértices de un cubo.

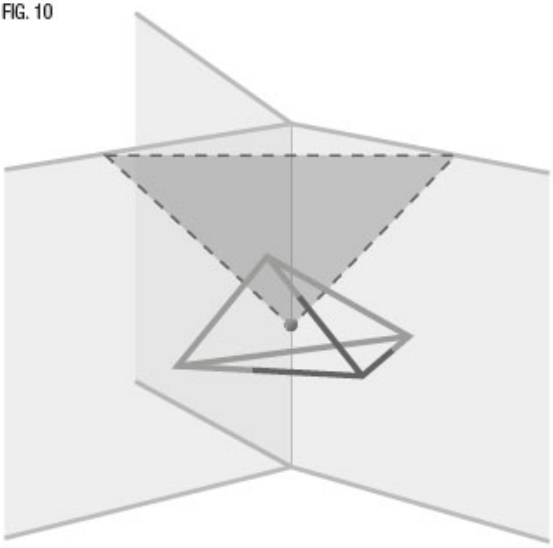
FIG. 9



Tetraedro y dodecaedro-icosaedro. Izquierda: el tetraedro es autodual, ya que los centros de sus cuatro caras triangulares forman otro tetraedro. Centro y derecha: por su parte, el dodecaedro es la figura cuyos vértices son los centros de los 20 triángulos equiláteros de un icosaedro. Inversamente, el icosaedro tiene 12 vértices, cada uno con cinco triángulos equiláteros. Estos vértices son los centros de los 12 pentágonos que forman un dodecaedro.

Ya estamos en disposición de afrontar la discretización correcta de la relatividad general. Consideremos primero el caso tridimensional. Recordemos que la triangulación del espacio se realizaba mediante 3-símplices o tetraedros. El dual de esta triangulación se obtiene como sigue, y como se ilustra en la figura 10: primero, colocamos un vértice (•) dentro de cada ttraedro; segundo, unimos los vértices de dos tetraedros adyacentes mediante un lado dual al triángulo que separa ambos tetraedros (línea discontinua); finalmente, asociamos una cara a cada segmento de la triangulación (planos verticales), acotada por los lados que rodean tal segmento.

FIG. 10



Dual de una triangulación y 2-complejo. El tetraedro central pertenece a la triangulación, mientras que las caras oscuras, los lados (líneas discontinuas) y el vértice en que se unen estos forman el dual. La frontera del dual viene dada por los enlaces (líneas continuas) y los nodos donde estos se unen. El 2-complejo es el conjunto del dual de la triangulación y la frontera que lo acota. Por simplicidad, solo se muestra un tetraedro.

El conjunto de vértices, lados y caras, junto con sus relaciones de frontera, se denomina un 2-complejo, que puede visualizarse como un conjunto de caras que se unen en lados, que a su vez lo hacen en vértices. Lo que define el 2-complejo es la estructura combinatoria de las relaciones de frontera entre estos elementos.

La frontera, recordemos, es la figura geométrica que acota otra. La discretización de una región acotada de espacio implica una discretización de su frontera. Como la triangulación consiste en tetraedros, su frontera viene dada por los triángulos que acotan tales tetraedros. A su vez, estos triángulos de la frontera están separados a través de los segmentos de la frontera de la triangulación. Los puntos extremos de los lados duales a estos triángulos se denominan nodos o vértices de frontera (puntos de intersección de las líneas continuas en la figura 10), mientras que las fronteras de las caras duales a tales segmentos se conocen como enlaces o lados de frontera (las mencionadas líneas continuas en la figura). El conjunto de estos nodos y enlaces se denomina el *grafo* de la frontera.

Llegados a este punto, ya tenemos todos los ingredientes necesarios para pasar a la teoría cuántica. La idea esencial es construir un espacio matemático, conocido como *espacio de Hilbert*, donde las variables fundamentales que describen la física, es decir, las longitudes de los enlaces que definen la triangulación dual, adquieren propiedades cuánticas: estas longitudes se convierten en operadores que, en general, no conmutan entre sí. La consecuencia física de esta no conmutatividad es el carácter discreto del espectro de las longitudes de los enlaces. En otras palabras, estos enlaces no pueden tener cualquier longitud: los enlaces están formados por unidades elementales de longitud, de la misma forma que la luz está formada por unidades elementales de radiación, los fotones.

Es esencial no confundir la discretización clásica introducida mediante la triangulación dual del espacio y la discretización cuántica, que resulta del hecho de que los operadores de longitud poseen un espectro discreto. El primer caso, clásico, es simplemente una aproximación al espacio continuo, el cual se obtiene «refinan-

do» la triangulación dual, esto es, llevando el número de los vértices a infinito (como hay un vértice por tetraedro, esto equivale a tomar infinitos tetraedros). Por el contrario, el segundo caso es genuinamente cuántico, y quiere decir que las longitudes de los enlaces no pueden tomar cualquier valor, sino que están compuestas por longitudes elementales. Pues bien, estas longitudes elementales son el análogo gravitatorio de la estructura atómica de la materia, de ahí que se puedan concebir como átomos de espacio-tiempo.

Un grafo a cuyos enlaces se les asigna un valor de espín se denomina una *red de espines*. Estas redes de espines son los estados cuánticos del campo gravitatorio. Resulta que estas redes de espines ya fueron estudiadas por el físico y matemático inglés sir Roger Penrose en 1971, si bien con un objetivo ligeramente distinto. La idea de Penrose era conseguir que tanto el espacio-tiempo como la mecánica cuántica emergiesen de unas estructuras combinatorias desprovistas de toda noción de distancia o tiempo (es decir, mediante combinaciones de elementos a través de ciertas reglas, como saber cuántas veces se puede obtener cierto resultado tras un número determinado de tiradas de un dado). En el caso de la gravedad cuántica de bucles, el espacio-tiempo no desaparece exactamente: es un concepto aproximado a entidades, los átomos de espacio-tiempo, con una naturaleza discreta, pero aun así podemos hablar de «geometría»: longitudes, áreas… Lo que desaparece es el sentido ordinario, cotidiano, de estos conceptos, pero no los conceptos en sí mismos. Por el contrario, en las redes de espines de Penrose los propios conceptos de espacio y tiempo no existen.

Pero un par de décadas después de su pionero trabajo, Penrose vio cómo una versión geométrica de su red de espines se convertía

en el elemento central de la gravedad cuántica de bucles. El programa iniciado por Penrose sigue vivo hoy día, aunque no ha conseguido erigirse como una alternativa seria en la búsqueda de la gravedad cuántica.

Volvamos a nuestro análisis del papel que desempeñan las redes de espines en la gravedad cuántica de bucles. Recordemos que aquí una red de espines es un grafo a cuyos enlaces se les asigna un valor de espín. En este contexto, tienen una interpretación geométrica simple: el valor de espín indica la longitud de un enlace dado. Cuanto mayor sea este valor de espín, más largo será el enlace correspondiente. Resulta claro cómo emerge el continuo en esta situación: necesitamos que los enlaces sean infinitamente largos, lo que implica que los valores de los espines tiendan a infinito.

Hemos analizado el caso tridimensional porque, además de ser mucho más sencillo técnicamente, es posible visualizar los tetraedros o 3-símplices de la triangulación. El caso realista de cuatro dimensiones es muy similar conceptualmente, solo hay que subir la dimensión de todos los conceptos. La triangulación ahora viene dada mediante 4-símplices, que sigue teniendo vértices como duales. Y la frontera de estos 4-símplices son 3-símplices o tetraedros, de tal forma que ahora los enlaces no son líneas, sino triángulos.

La espuma cuántica, o cómo evolucionan las redes de espines

Una vez que tenemos los estados cuánticos del campo gravitatorio, las redes de espines, lo siguiente que hemos de estudiar es de qué forma varían tales estados. Pero recordemos que hablamos de estados cuánticos, de modo que la evolución de dichas redes de espines estará sujeta a las reglas de la mecánica cuántica.

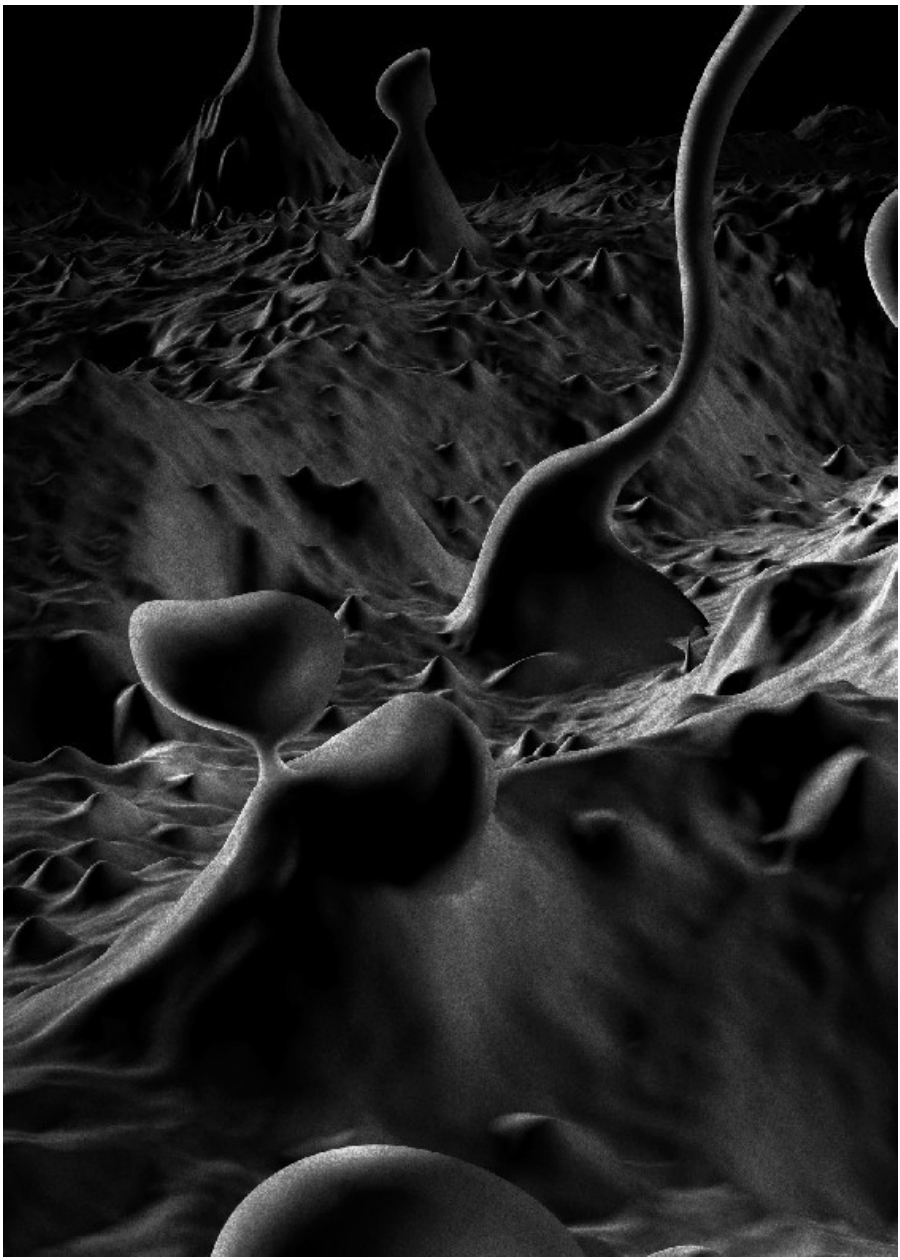
En física atómica, por ejemplo, podemos estudiar la probabilidad de que un cierto estado, digamos un átomo de hidrógeno, gane un

neutrón, para convertirse en el isótopo conocido como deuterio. El estado inicial del sistema es el átomo de hidrógeno, cuyo núcleo solo tiene un protón, mientras que el estado final es el deuterio, donde se añade un neutrón al núcleo. La evolución temporal del sistema desde el estado inicial hasta el final está gobernada por la célebre ecuación de Schrödinger, a partir de la cual es posible calcular las distintas probabilidades asociadas a diversos procesos. En nuestro caso, que el estado final sea un átomo de deuterio. A la probabilidad de pasar de un estado inicial a uno final se le denomina *amplitud de transición.*

En el caso de la gravedad cuántica de bucles, también tenemos las correspondientes amplitudes de transición. La diferencia respecto de nuestro átomo de hidrógeno es que ahora los estados inicial y final son redes de espines determinadas. Existe, no obstante, una diferencia conceptual crucial. De nuevo, la razón es el carácter dinámico del espacio-tiempo. Recordemos que estas redes de espines denotan átomos de espacio-tiempo, y es fundamental que el tiempo esté incluido. No hablamos de la evolución temporal de átomos de espacio. No. Hablamos de la evolución de átomos de espacio-tiempo. Pero ¿evolución en qué o respecto de qué? Este es el legado de la relatividad general de Einstein. La naturaleza dinámica del espacio-tiempo, al contrario de la fija e inmutable de la física newtoniana o de la propia mecánica cuántica, nos dice que la evolución de un sistema no es respecto de nada externo (el tiempo newtoniano), sino en relación con otros sistemas o con otras partes del mismo sistema. Así, estamos acostumbrados a hablar de «un año» cuando la Tierra realiza una traslación alrededor del Sol, y nos referimos a un año fijo y externo al sistema Sol-Tierra. Ahora bien, podemos igualmente describir la traslación de la Tierra en

torno al Sol sin hacer referencia a ningún tiempo externo: basta con considerar el ángulo que forma una línea imaginaria conectando los centros de ambos cuerpos.

Aplicando esta evolución relacional al caso de las redes de espines, la pregunta que tiene sentido físico es la siguiente: dado un estado de espín inicial, ¿cuál es la probabilidad de que el estado del sistema sea una red de espín final concreta? Dicha probabilidad viene determinada por una amplitud de transición entre las dos redes de espines. Las propiedades más importantes de estas amplitudes de transición son el principio de superposición y la invariancia bajo *transformaciones de Lorentz*.

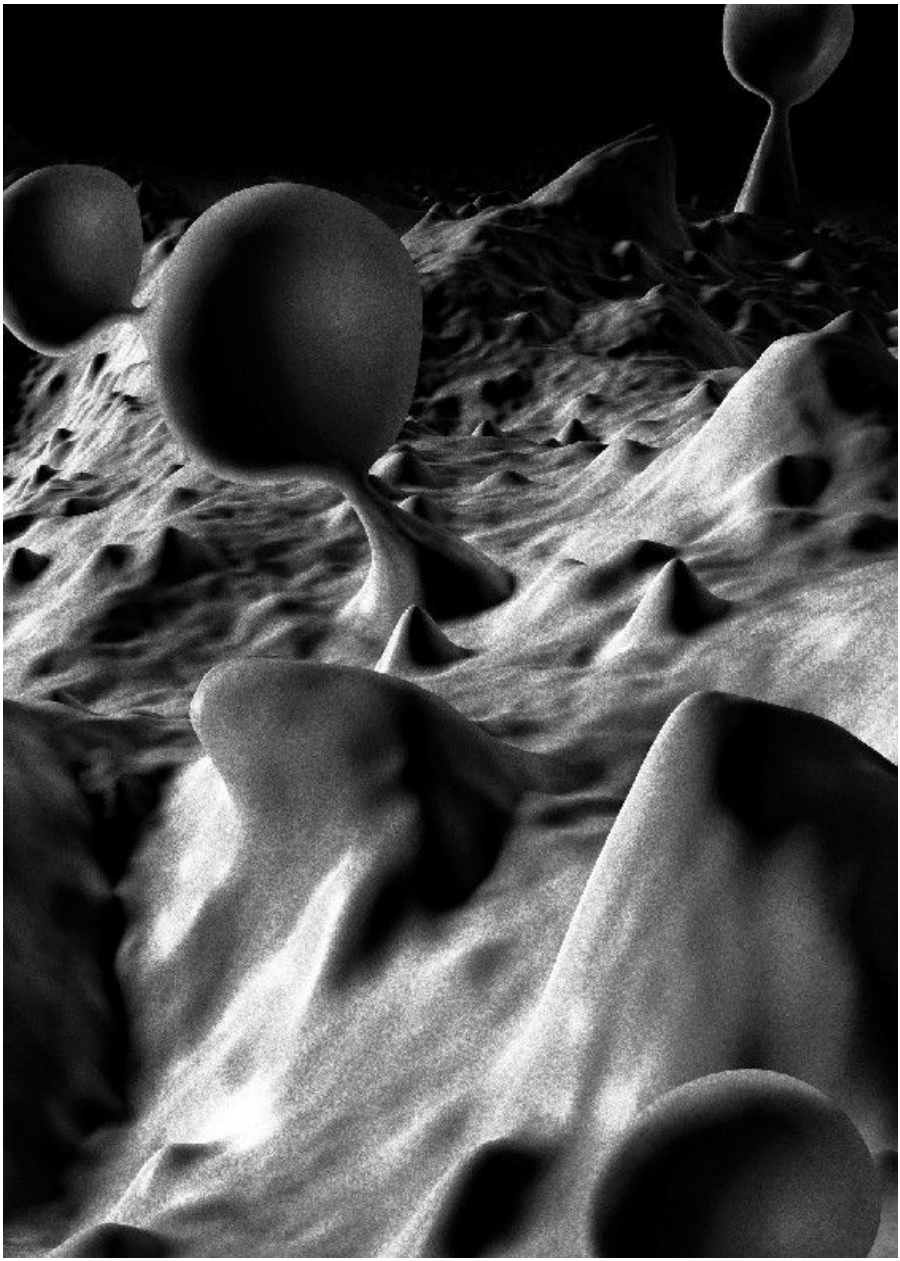


LA ESPUMA CUÁNTICA

La espuma cuántica es la sucesión de estados intermedios entre dos átomos de espacio-tiempo o redes de espines, las unidades elementales de la gravedad cuántica de bucles. La película de la transición entre los estados inicial y final es la espuma cuántica; las diversas tomas, las sucesivas redes de espines intermedias.

La espuma cuántica implica que el espacio y el tiempo poseen una estructura granular y difusa a las es-

calas más fundamentales.



Las burbujas de espacio-tiempo que emergen del «vacío» cuántico son las estructuras que, al unirse miles de millones de ellas, crean el espacio y el tiempo cotidianos.

El principio de superposición es el principio básico de la mecánica cuántica. Recordemos que una superposición es el conjunto

de todos los estados posibles de un sistema físico, del que solo se puede saber la probabilidad de que se halle en uno u otro estado. Este principio afirma que la amplitud de transición de un estado inicial a un estado final puede interpretarse como la suma de amplitudes de transición elementales, es decir, amplitudes entre estados intermedios entre los estados inicial y final. En el caso de la gravedad cuántica de bucles, a esta sucesión de estados intermedios se le denomina *espuma de espines* o *espuma cuántica*. Si grabamos una película de la transición entre los estados inicial y final, cada toma es uno de los estados intermedios. La película es la espuma de espines; las diversas tomas, las sucesivas redes de espines intermedias (véase la imagen de las págs. 70-71).

La *simetría de Lorentz* está en el corazón de la relatividad. Afirma que las leyes de la física son las mismas para todos los observadores inerciales, es decir, en reposo o con velocidad relativa uniforme. La simetría de Lorentz es la generalización relativista del principio de Galileo, que solo se aplica a sistemas inerciales donde la velocidad relativa es muy inferior a la velocidad de la luz en el vacío. Estrictamente, la simetría de Lorentz es una propiedad del espacio-tiempo plano de la relatividad especial. En relatividad general, donde el espacio-tiempo está dotado de curvatura (campo gravitatorio), la simetría de Lorentz es válida de manera *local*, es decir, en regiones del espacio-tiempo suficientemente pequeñas. La idea es aproximar una región curva mediante la unión de muchas porciones planas. Imaginemos nuestro planeta. Con muy buena aproximación, se puede considerar una esfera. Una persona caminando sobre la superficie no se percata de la esfericidad de la Tierra: a efectos prácticos, camina sobre una superficie plana. Solo cuando consideramos distancias muy grandes somos capaces de percibir la

curvatura de nuestro planeta, como al mirar al horizonte en la playa. De hecho, Aristóteles dedujo que la superficie de la Tierra era curva al observar que lo último visible de un barco al perderse por el horizonte era el mástil. En este sentido local, en relatividad general dos observadores están ligados mediante transformaciones de Lorentz.

Se suele considerar que una teoría con una longitud mínima rompe la simetría de Lorentz. El argumento es el siguiente. Una de las implicaciones de las transformaciones de Lorentz es la contracción de la longitud de un objeto para un observador en movimiento relativo respecto de tal objeto, de forma que dicha contracción solo existe en la dirección del movimiento relativo. Ahora supongamos que un observador mide una longitud que se considera mínima: no hay longitudes menores que ella. Para un observador en movimiento relativo respecto del anterior, tal longitud se contraerá, de modo que la longitud que él mide es inferior a la longitud vista por el primer observador. Pero hemos dicho que esta longitud es mínima. ¿Cómo puede medir otro observador una longitud menor? Llegamos de este modo a una contradicción.

Sin embargo, la gravedad cuántica de bucles respeta la simetría de Lorentz, algo que no es para nada obvio. La clave para entenderlo está en la naturaleza dinámica de la geometría cuántica, esto es, una vez más, el legado de Einstein en acción. La «naturaleza dinámica» significa que todas las propiedades de la geometría que se pueden medir (longitudes, áreas, volúmenes, etc.) no tienen valores fijos, sino que dependen del campo gravitatorio. Pero, ahora, este campo ya no es clásico sino cuántico, de modo que estamos hablando de la medida de un sistema cuántico, y tales medidas son radicalmente diferentes al concepto ordinario de medida.

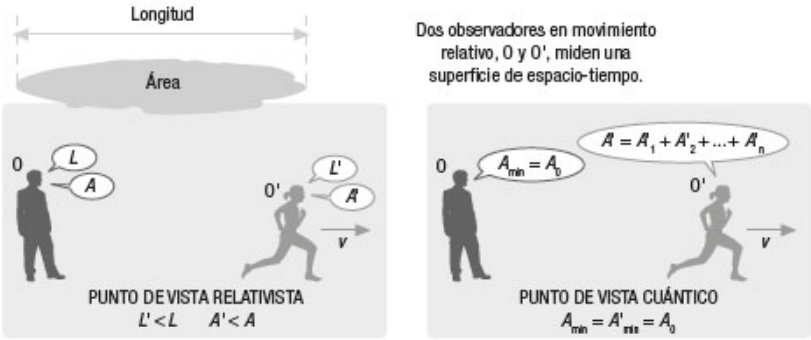
Recordemos que la mecánica cuántica no predice el valor de una magnitud dada, sino las distintas probabilidades de que al medir se obtenga alguno de los valores posibles. Supongamos una superficie moviéndose en el espacio-tiempo, como se muestra en la figura 11. Imaginemos dos observadores O y O' en movimiento relativo. Cada uno de ellos realiza una medida del área de tal superficie. Pero son dos medidas cuánticas distintas. La teoría cuántica nos enseña que, en general, es imposible para dos observadores realizar medidas simultáneas de los valores de una magnitud dada. La razón es que esta magnitud se convierte en un operador cuántico, que, como mencionamos anteriormente, se caracteriza porque no cumple la conmutatividad de la multiplicación. Tenemos, pues, dos operadores A y A', asociados a los observadores O y O', correspondientes al área de la superficie, que no conmutan entre sí.

Realicemos las medidas. Primero es O quien mide el área mínima $A0$ predicha por la teoría. Ahora es el turno de O'. Ingenuamente, se podría pensar que medirá un valor menor, pues se halla en movimiento relativo respecto de O. Pero eso sería olvidar lo que significa una medida en mecánica cuántica. Una vez que O ha medido $A0$, el estado cuántico del campo gravitatorio que ve O' es una superposición cuántica de todos los estados posibles de dicho campo. Lo único que puede hacer es realizar muchas medidas del área de la superficie y obtener las probabilidades asociadas a cada valor. El resultado es que el valor medio del área sí puede ser menor (como consecuencia de la contracción) que el valor medio medido por O, pero, de entre todos los posibles valores que obtiene O' para el área, el valor mínimo sigue siendo $A0$. Por tanto, la gravedad cuántica de bucles, a pesar de su geometría discreta, preserva la simetría de Lorentz.

Es conveniente recalcar que esta simetría de Lorentz solo es válida de manera local (como herencia de la relatividad general). En este caso, la simetría existe si consideramos elementos muy pequeños de la triangulación, esto es, 4-símplices tomados de manera que se pueda obviar la curvatura de Regge.

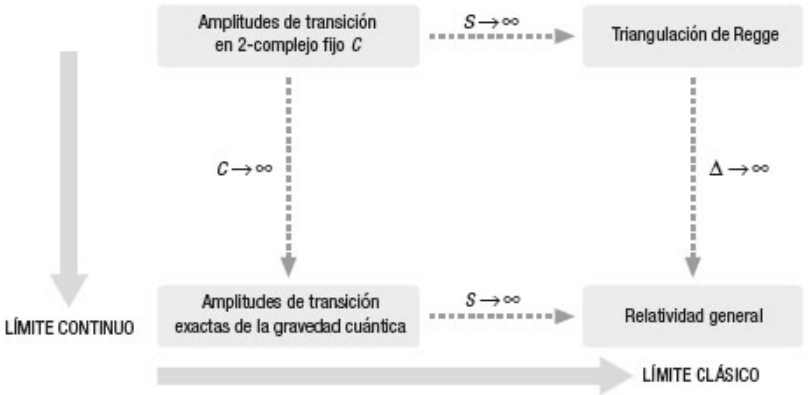
Para concluir este apartado, distinguiremos entre dos tipos de límites que suelen causar confusión. Uno de ellos es el límite clásico, esto es, donde pueden despreciarse los efectos cuánticos de la gravitación, de forma que deberíamos recuperar la relatividad general. El otro es el límite continuo, que significa mejorar la aproximación descrita mediante una discretización. Para ello, se toman infinitos elementos de la triangulación asociada a tal discretización. Para aclarar ideas, en la figura 12 se indican las cuatro teorías y las relaciones entre ellas. En la parte superior izquierda tenemos las amplitudes de transición, que se definen sobre un 2-complejo fijo. Las auténticas amplitudes de transición de la gravedad cuántica de bucles se obtienen refinando estos 2-complejos, esto es, consideramos infinitos 2-complejos. Al hacerlo, nos movemos hacia la parte inferior izquierda de la tabla. Por su parte, si partimos del 2-complejo fijo y consideramos valores cada vez mayores del espín asociado a una red de espines, nos movemos hacia la parte superior derecha. En este límite, las amplitudes de transición dan lugar a las ecuaciones de la relatividad general discretas, esto es, las ecuaciones en el espacio de Regge. Si ahora refinamos la triangulación de Regge, tomando infinitos 4-símplices, obtenemos la relatividad general, la parte inferior derecha de la tabla.

FIG. 11



La simetría de Lorentz y la gravedad cuántica de bucles. La relatividad (figura de la izquierda) diría que, debido a la contracción de Lorentz, la longitud y el área medidas por O' (*L'* y *A'*) son menores que las medidas por O (*L* y *A*). En mecánica cuántica (derecha), la situación es más complicada: mientras que O mide un área mínima de valor A_0, O' ve una superficie en una superposición de estados, cuyo valor mínimo también es A_0.

FIG. 12



Los distintos límites en la gravedad cuántica. La parte superior corresponde a la geometría discreta, mientras que la inferior corresponde a la continua. Por su parte, la columna izquierda representa el mundo cuántico; la derecha, el clásico. En el esquema, *C* es un 2-complejo, *S* es el espín, y Δ, la triangulación.

Finalmente, si partimos de las amplitudes de transición exactas de la gravedad cuántica (parte inferior izquierda), tomando el límí-

te clásico (valores suficientemente altos de los espines) llegamos a la relatividad general. La verdadera gravedad cuántica está en la parte inferior izquierda de la figura 12 porque es ahí donde confluyen lo cuántico (espectro discreto) y la mejor aproximación posible (valor exacto). En gravedad cuántica, el límite clásico corresponde a situaciones cuyas distancias son mucho mayores que la longitud de Planck. Por su parte, recordemos que una buena triangulación es aquella donde la curvatura de Regge, o ángulo de déficit, es pequeña. La gravedad cuántica es el régimen donde confluyen escalas del orden de la escala de Planck y curvaturas arbitrarias.

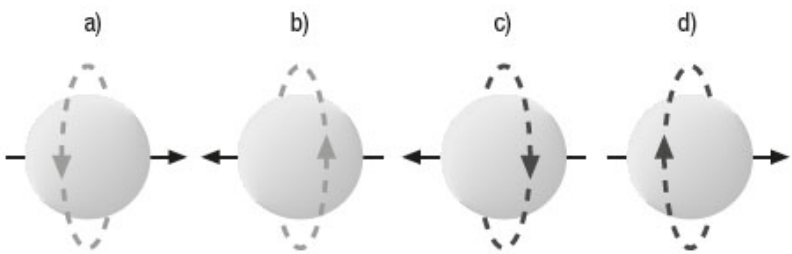
LA MATERIA ENTRA EN ESCENA

Hasta ahora, nos hemos centrado en el estudio de la geometría cuántica sin nada más. Pero el mundo no es solo geometría: tenemos las masas de los cuerpos.

Todas las partículas con masa (electrones, quarks…) tienen una propiedad denominada espín. El espín es un momento angular intrínseco a la partícula, lo que significa que no depende de nada externo a ella. Por su parte, el momento angular ordinario, a diferencia del espín, sí depende de elementos externos al cuerpo: la posición y su momento lineal (equivalentemente, velocidad) han de expresarse con relación a algún sistema de referencia externo a la partícula. Ahora bien, el espín es una propiedad puramente cuántica de las partículas: no hay ningún análogo clásico. La imagen de un electrón como una pequeña peonza no es exacta. No obstante, la imagen mostrada en la figura 13 sirve para ilustrar la idea. En el caso de la figura a), se dice que la partícula es «diestra» porque exhibe la misma orientación que la mano derecha: si el dedo pulgar apunta en el sentido del desplazamiento de la partícula, el resto

de los dedos, cerrados sobre la palma de la mano, lo hacen en el sentido del espín. Se define la *helicidad* de una partícula como la orientación del espín respecto del desplazamiento de la partícula, en el sentido descrito. Obviamente, podemos dibujar la misma partícula diestra de la forma que muestra la figura b). Es decir, invirtiendo tanto el sentido del espín como el desplazamiento, obtenemos el mismo tipo de helicidad. Si solo se invierte el sentido del desplazamiento, pero no el de espín, obtenemos una partícula con la helicidad opuesta.

FIG. 13



Espín de una partícula. La flecha discontinua indica el sentido del espín, esto es, el sentido de giro de la partícula alrededor de su propio eje. La flecha negra continua denota el sentido del desplazamiento de la partícula. Estas dos flechas definen una orientación. Las partículas a) y b) son diestras; la c) y la d), zurdas.

Dado un tipo concreto de partícula, digamos un electrón, tenemos de manera automática las dos versiones, diestra y zurda.

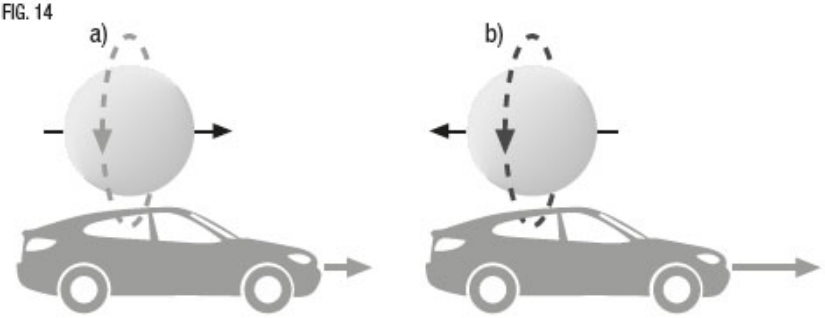
Consideremos ahora la masa. Para ilustrar los conceptos que son relevantes en gravedad cuántica, usaremos el concepto de masa según la relatividad (después de todo, la gravedad cuántica incluye la relatividad).

Una partícula sin masa (como el fotón) viaja a la velocidad de la luz en el vacío y nunca podemos alcanzarla. No existe ningún sistema de referencia en el cual una partícula sin masa esté en reposo.

Imaginemos que estamos en una carretera: si conducimos a la misma velocidad que el coche del carril de al lado, parece que dicho coche no se mueve respecto de nosotros. Sustituyamos el coche por una partícula (figura 14): si no tiene masa, nunca parecerá estar en reposo respecto de nosotros. Por el contrario, una partícula con masa viaja a una velocidad menor que la luz en el vacío, de modo que, en principio, es posible alcanzarla, y que esté en reposo respecto de nosotros.

De hecho, nos podemos mover más rápido que la partícula y, como resultado, nos da la sensación de que esta se mueve en el sentido contrario (ahora, el coche de la figura a) parecería moverse hacia la izquierda). Pero el sentido del espín no ha cambiado (sigue siendo diestra). Ahora bien, hemos dicho que si solo invertimos el sentido del desplazamiento de la partícula —manteniendo el espín intacto—, cambiamos su helicidad, como se representa en la figura b).

FIG. 14



En el caso de partículas sin masa, no es posible alcanzarlas de forma que estén en reposo respecto de nosotros. Por su parte, sí es posible adelantar a las partículas con masa: al cambiar solo el sentido del desplazamiento de la partícula, pero no su espín, pasamos de la partícula diestra de la figura a) a la partícula zurda de la figura b).

Hemos pasado de una partícula diestra a una zurda. Pero ¿ha cambiado la propia partícula? Claramente, no. Lo único que hemos

hecho es pasar de un sistema de referencia (donde la partícula era diestra) a otro sistema de referencia (donde es zurda). Y la relatividad nos enseña que todos los sistemas de referencia son igualmente válidos.

De modo que la partícula es la misma. La cuestión es que la masa de una partícula nos dice si la helicidad es o no una propiedad intrínseca de la partícula. Como hemos visto, en el caso de masa nula, la helicidad es siempre la misma en todos los sistemas de referencia, porque no es posible «adelantar» a esa partícula y, por tanto, no podemos invertir el sentido del desplazamiento aparente respecto de nosotros. Por su parte, si la partícula tiene masa, la helicidad deja de ser una propiedad inherente a la partícula, puesto que diferentes observadores en distintos sistemas de referencia medirán diferentes valores de la helicidad (diestra o zurda). La conclusión es que, a pesar de ser un concepto fácil de visualizar, la helicidad no es una propiedad fundamental de una partícula.

¿Existe alguna propiedad de una partícula que esté relacionada con la helicidad pero que sí sea intrínseca a dicha partícula? En otras palabras, buscamos alguna propiedad que, en primer lugar, sea equivalente a la helicidad en el caso de masa nula y, en segundo lugar, tenga el mismo valor en todos los sistemas de referencia para una partícula con una masa dada. La respuesta es afirmativa. Existe tal propiedad y se denomina *quiralidad*. El concepto es algo más abstracto que el de helicidad.

Ambos conceptos, helicidad y quiralidad, son bastante similares. Al igual que una partícula puede tener helicidad diestra o zurda, también hablamos de quiralidad diestra o zurda. Y para partículas sin masa, ambas coinciden. Sin embargo, una partícula con masa posee una quiralidad específica, pero no helicidad. Así, una par-

tícula con masa y quiralidad zurda puede tener helicidad diestra o zurda dependiendo del sistema de referencia relativo a la partícula. Pero en todos los sistemas de referencia la partícula tendrá quiralidad zurda, con independencia de cuál sea su helicidad.

Para explicar el concepto de quiralidad, que es una propiedad inherentemente cuántica, nos restringiremos al caso de fermiones con espín $s = 1/2$, como el electrón. Antes de ello, es necesario refrescar algunas nociones básicas sobre los *números complejos*, que son una generalización de los números reales a dos dimensiones.

Una manera de definir un número complejo es como una combinación de dos números reales. En la figura 15 se muestra el *plano complejo*, donde el eje de los números reales es el horizontal y el eje de los números imaginarios es el vertical. En este plano, un número complejo se puede representar como una flecha que va desde el origen hasta el punto marcado por las coordenadas horizontal y vertical. El módulo, r, del número complejo es la longitud de esa flecha. Por su parte, el *argumento*, ϕ, es el ángulo que forma la flecha con el eje horizontal. El módulo y el argumento de un número complejo sirven para realizar otra representación distinta de este, que se conoce como *forma polar* de un número complejo y que es la más utilizada en mecánica cuántica.

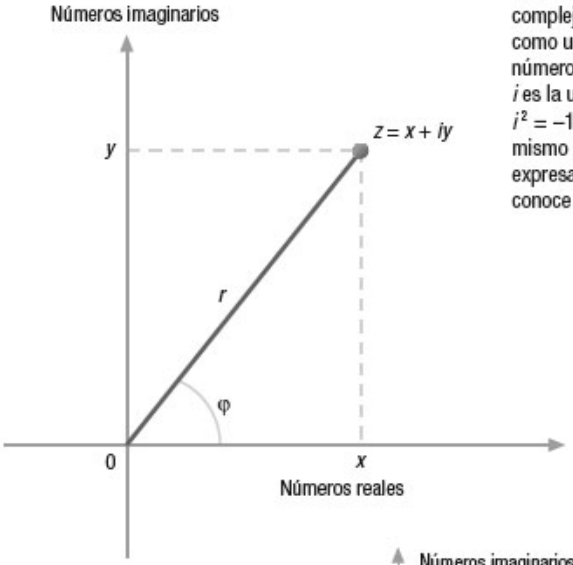
La representación polar de un número complejo se muestra en la figura 16. Supongamos un círculo de radio unidad. Dado un punto sobre él, señalado en la figura por la punta de la flecha, tenemos su proyección sobre los dos ejes: real (horizontal) e imaginario (vertical). Estas proyecciones dependen del argumento del número complejo. ¿Y el módulo? Para ello, hemos de considerar un círculo de cierto radio, y justamente ese radio será el módulo.

Veamos por qué es importante el uso de los números complejos.

En mecánica cuántica, el estado de un sistema viene determinado por su *función de ondas*, que es una magnitud compleja (en el sentido de tomar valores que son números complejos). Así, podemos representar la función de ondas de un sistema cuántico usando la representación polar, donde el argumento se denomina la *fase* de la función de ondas. Y aquí es donde la quiralidad juega su papel.

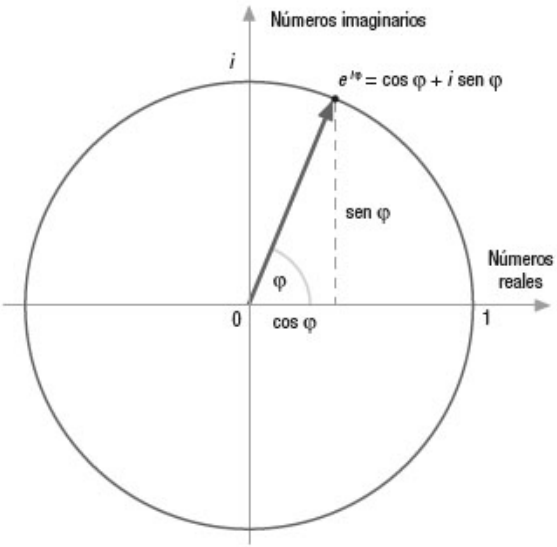
Retomemos nuestros fermiones en el caso concreto de espín $s = 1/2$. Resulta que la función de ondas de un fermión es un objeto matemático denominado espinor. Para nuestros propósitos, lo único que necesitamos saber es que un espinor cambia de signo cuando se rota 360°. En otras palabras, si rotamos un electrón 360° alrededor de su eje, no obtenemos el mismo estado cuántico, sino su negativo. La quiralidad de este fermión nos dice de dónde viene este signo negativo en términos de un número complejo, como se muestra en la figura 17.

FIG. 15



Plano complejo. Un número complejo z se puede representar como una combinación de dos números reales, $z = x + iy$, donde i es la unidad imaginaria (tal que $i^2 = -1$). Alternativamente, el mismo número complejo puede expresarse como $z = re^{i\varphi}$, que se conoce como representación polar.

FIG. 16



Representación polar de un número complejo. Dado un punto sobre la circunferencia, la proyección real es $\cos\varphi = x$, mientras que la imaginaria es $\operatorname{sen}\varphi = y$. En el caso de un círculo de radio r, tenemos: $r\cos\varphi = x$, $r\operatorname{sen}\varphi = y$. Gracias a la célebre fórmula del genial matemático suizo Leonhard Euler, vemos que el mismo número complejo se expresa de dos formas: $z = x + iy = r\cos\varphi + + ir\operatorname{sen}\varphi = re^{i\varphi}$.

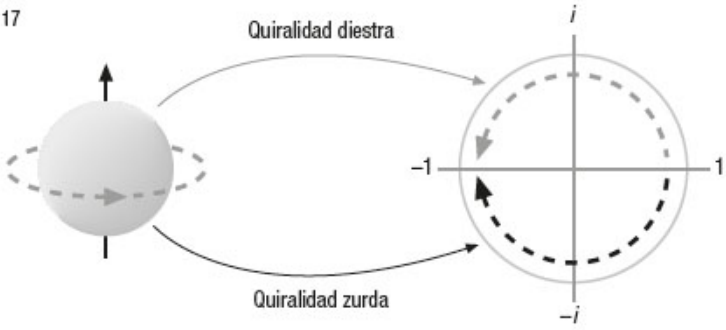
La diferencia entre dos fermiones con quiralidades opuestas se manifiesta en el sentido en que las respectivas fases recorren el

plano complejo. No obstante, a pesar de ello, ambas fases adquieren un valor −1 cuando ambos fermiones se rotan 360° alrededor de sus ejes de movimiento. Conviene aclarar que esta situación solo se aplica para partículas de espín 1/2. En el caso de un espín arbitrario, *s*, para que la fase de la partícula adquiera un valor −1, hay que rotar dicha partícula un ángulo $_{p}/s$ alrededor de su eje de movimiento. Obviamente, para $s=1/2$, tenemos $_{p}/s=2_{p}$ radianes, es decir, 360°. El significado físico de ello es la fase de la función de ondas de la partícula. Cuando se rota un fermión, su función de ondas se desplaza de una forma que depende de la quiralidad del fermión, como se muestra en la figura 18.

No nos tenemos que preocupar demasiado por este desplazamiento de la fase de la función de ondas. La cuestión es que la quiralidad se halla relacionada íntimamente con las propiedades intrínsecamente cuánticas de la partícula.

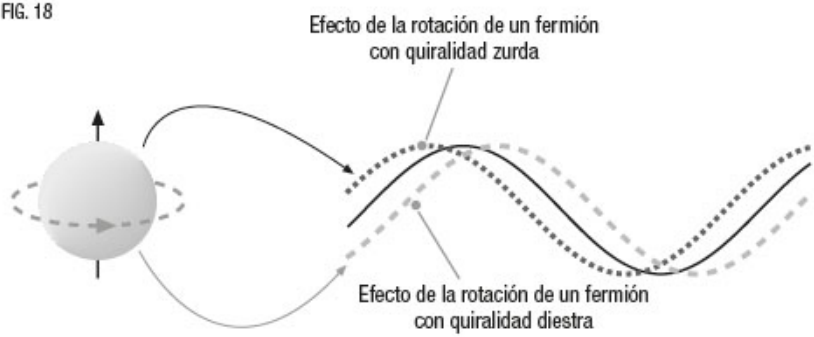
El mensaje que debe quedarnos es el siguiente: las partículas con quiralidades diferentes son realmente partículas distintas. Si tenemos una partícula con helicidad zurda, sabemos que existe una versión de la misma partícula con helicidad diestra. Por su parte, una partícula con quiralidad zurda no tiene una versión diestra (pero, en cualquier caso, sí tendrá ambos tipos de helicidad). Por ejemplo, imaginemos un electrón con quiralidad zurda. Que su helicidad sea zurda o diestra depende del sistema de referencia desde el que lo observemos. Pero seguirá siendo el mismo electrón con quiralidad zurda. Ahora bien, también existe el electrón con quiralidad diestra, pero este segundo electrón ya no es la misma partícula que el electrón con quiralidad zurda.

FIG. 17



Comparación entre un fermión con quiralidad diestra frente a otro zurdo. A la izquierda se representa la rotación de 360° de un fermión cualquiera alrededor de su eje de movimiento. El círculo de la derecha muestra la fase del estado cuántico de la partícula: a medida que se rota el fermión, el valor de dicha fase se mueve a lo largo del plano complejo dado por dicho círculo, pero solo recorre la mitad del mismo, de 0° a 180°. Dos fermiones con quiralidades opuestas tendrán fases que recorrerán el plano complejo en sentidos opuestos.

FIG. 18



La función de ondas de un fermión sin rotar se representa mediante la curva continua. Al rotar dicho fermión, se desplaza su función de ondas: la función de ondas de un fermión con quiralidad diestra se desplaza en el sentido contrario a la correspondiente función de ondas de un fermión con quiralidad zurda. Este fenómeno es puramente cuántico.

El objetivo de esta explicación detallada del espín, la helicidad y la quiralidad es destacar la idea de que las partículas que existen en la naturaleza (electrones, protones…) son quirales, es decir, las versiones diestra y zurda son partículas distintas, como se ha comentado en el párrafo anterior. Simplemente hay que extender la teoría al caso con partículas con masa, para poder describir el carácter

quiral de las mismas. La gravedad cuántica de bucles funciona igual de bien en este caso.

RECAPITULACIÓN: SEPARANDO EL TRIGO DE LA PAJA

Conviene terminar este capítulo un tanto abstracto recapitulando las ideas que deben quedar claras. Vamos a separar el trigo físico de la paja matemática.

Los estados cuánticos del campo gravitatorio vienen descritos en términos de las redes de espines, que se pueden interpretar como átomos de espacio-tiempo, de forma que tenemos un espectro discreto de las magnitudes geométricas (longitudes, áreas y volúmenes). El resultado es la existencia de una escala mínima para estas magnitudes geométricas. Conviene enfatizar de nuevo una serie de cuestiones.

Es crucial no confundir el carácter discreto (cuántico) de los estados del campo gravitatorio con la aproximación que una triangulación ofrece de una región del espacio-tiempo cuántico. En particular, el hecho de tener grafos es una aproximación clásica, no cuántica, como consecuencia de tener en cuenta solo un número finito de «parches». En esta triangulación clásica, el área de las caras de los 4-símplices, así como el volumen de estos, pueden ser infinitamente pequeños. Por el contrario, la discretización cuántica se debe al carácter discreto de los espectros de áreas y volúmenes. Al igual que en el electromagnetismo, donde el carácter discreto del campo electromagnético viene dado por los fotones, los cuantos de luz. En consecuencia, no es posible que los 4-símplices ni otras estructuras geométricas tengan áreas o volúmenes infinita-

mente pequeños. Existe una escala mínima marcada por la constante de Planck.

A pesar de hablar constantemente de tetraedros y demás, esto es abusar del lenguaje en aras de la claridad de la explicación. La incertidumbre cuántica hace que los operadores de área y volumen sumen solo cinco números, mientras que la geometría de un tetraedro real requiere conocer seis números (por ejemplo, las longitudes de sus seis lados). Por tanto, a la escala cuántica no existen tetraedros en el sentido ordinario: es solo un concepto aproximado para tratar de visualizar la geometría cuántica. Lo mismo sucede con el concepto de electrón como una pequeña peonza. Simplemente, nuestro lenguaje ordinario no abarca la extrañeza del mundo cuántico.

Los átomos de espacio-tiempo descritos por las redes de espines no se mueven en ningún espacio-tiempo externo: ellos son el propio espacio-tiempo. En el caso del electromagnetismo, la posición de una determinada carga se da con respecto a un espacio exterior a ella, el espacio ordinario, donde la carga vive. En la gravedad cuántica, la «posición» no está bien definida. En su lugar, hablamos del tamaño intrínseco de los estados cuánticos (áreas y volúmenes), así como de un grafo que expresa las relaciones entre tales estados. En otras palabras, los estados cuánticos de la gravitación están colocados unos respecto de otros, y la relación de esta ubicación se expresa en términos de la naturaleza combinatoria del grafo. Este es el análogo cuántico del carácter dinámico del espacio-tiempo en la relatividad general, donde el campo gravitatorio no vive en ningún espacio-tiempo, sino que es el propio espacio-tiempo.

Como es general en cualquier teoría cuántica, hay que tener cui-

dado con la manera en la que interpretamos los conceptos. Por ejemplo, un péndulo clásico es un objeto que todos visualizamos sin problemas. Ahora bien, a nivel cuántico ya no tiene sentido pensar en el péndulo como formado por cuantos, aunque nuestro lenguaje y nuestra mente nos tientan a ello. En realidad, lo que llamamos péndulo es el resultado macroscópico de la interacción de energía cuantizada (discreta). Que obtengamos un péndulo y no otra cosa depende de la forma concreta en que interaccione esta energía cuantizada. Del mismo modo, las redes de espines, el cuanto del campo gravitatorio, no deben tomarse literalmente. La teoría predice que en una interacción donde el efecto de algo depende de su área o volumen, el resultado estará asociado a un área o volumen discretos.

Cosmología cuántica

En el capítulo anterior hemos detallado las principales propiedades de la gravedad cuántica de bucles. Entre ellas, la más importante es el carácter discreto de las magnitudes geométricas que forman el espacio-tiempo, como longitudes o áreas. En particular, hemos visto cómo la teoría predice la existencia de una longitud mínima, la longitud de Planck. El resultado es una geometría discreta, compuesta por átomos de espacio-tiempo, las redes de espines.

Con el fin de calibrar la plausibilidad de la teoría, es imperativo hacer predicciones sobre fenómenos que puedan observarse. El proceso consta de dos pasos. El primero es ser capaz de predecir fenómenos que ya se han observado. El segundo paso consiste en realizar nuevas predicciones sobre fenómenos que puedan observarse en el futuro. En este capítulo estudiaremos cómo la gravedad cuántica de bucles reproduce la fórmula de la entropía de los agujeros negros que, como veremos a lo largo de las páginas que siguen, constituye una piedra de toque importante para cualquier teoría candidata a explicar la gravedad cuántica. Además, veremos cómo se modifica la historia del universo que se suele contar.

DINAMITANDO EL BIG BANG

La frase estrella de casi cualquier libro de divulgación sobre cosmología dice que nuestro universo se creó de la nada hace unos 13800 millones de años en un suceso cataclísmico conocido como Big Bang. El objetivo de este apartado es convencer al lector de que la frase anterior es falaz. Pero antes resulta conveniente describir ese campo del saber que es la cosmología, así como nuestro conocimiento actual sobre ella.

Un error bastante común es pensar que la cosmología se dedica a estudiar todo lo que existe en el universo. Nada más lejos de la realidad. Lo que realmente hace la cosmología es analizar la estructura del universo, del cosmos, a las escalas más grandes, obviando todos los objetos cuyo impacto en la evolución del universo es mínimo. Las escalas de las que hablamos son mayores de cien millones de pársecs. Dado que un pársec equivale a unos 3,26 años-luz, estas escalas son descomunales.

Los astrónomos se dedican a estudiar sistemas estelares individuales. Dentro del sistema solar, una de las preguntas más acuciantes se refiere al hecho de si la Tierra es el único planeta en el que la vida es posible. Existen indicios de la existencia pasada de vida en otros cuerpos del sistema solar, como Marte o Titán. O incluso de que aún siga existiendo. Recientemente, este tipo de estudios ha traspasado las fronteras del sistema solar gracias al lanzamiento del satélite Kepler, cuya misión es explorar sistemas lejanos y hallar planetas en la llamada *zona de habitabilidad*, es decir, aquella en la que se da el conjunto de condiciones favorables para la vida. Por su parte, los astrofísicos están interesados en aspectos más globales de las galaxias, las supernovas, los agujeros negros y demás objetos que no forman parte de nuestro entorno cósmico, pero tampoco de las escalas más grandes del universo. Por último, los cosmólogos son los que se dedican a estudiar aquellas cuestiones que rigen la evolución del cosmos. Magnitudes como la masa o energía, la densidad o la temperatura del universo son las que mantienen a los cosmólogos en vela. El conocimiento de este tipo de magnitudes nos permite conocer la historia de nuestro universo, así como arrojar luz sobre su destino.

A las escalas más grandes, la parte observable de nuestro uni-

verso, esto es, la región a la que tenemos acceso gracias a la luz que nos llega de zonas muy lejanas, es muy homogéneo e *isótropo*. Que es homogéneo quiere decir que la masa, temperatura, etc., están repartidas de manera similar. No hay regiones del universo con una masa descomunal y otras con masas ínfimas, por ejemplo. Por su parte, «isótropo» significa que se ve igual en todas las direcciones. Dados varios observadores en distintas regiones del universo, verán esencialmente lo mismo en todas las direcciones. Nuestra posición en el cosmos no tiene nada de especial. Además de la homogeneidad e isotropía a las escalas más grandes, otra de las propiedades del universo es la aparente ausencia de curvatura. La región observable del cosmos es casi plana. Ello no significa que todo el universo sea plano. La humanidad ya cometió este error en el pasado: debido al hecho de que a las escalas cotidianas la superficie de la Tierra parece ser plana, nuestros antepasados dedujeron, erróneamente, que todo el planeta era plano. Lo mismo sucede con el universo. Lo único que podemos decir es que la porción del cosmos que ya hemos observado se aproxima muy bien a una superficie plana. Pero, al igual que la Tierra, el universo en su conjunto puede ser una esfera o un hiperboloide, o cualquier otra estructura que posea curvatura.

Estas tres características, homogeneidad, isotropía y ausencia de curvatura, permiten una descripción relativamente sencilla de las escalas más grandes del universo. Dado que en esta situación la gravedad es la fuerza más importante, ya que es la fuerza en acción dondequiera que haya masa (recordemos que las fuerzas nucleares solo tienen alcance a escala nuclear; el electromagnetismo sí es una fuerza de largo alcance, pero las estructuras que conforman el universo, como los cúmulos de galaxias, son, en promedio,

neutras), la teoría relevante para la cosmología es la relatividad general de Einstein. Mejor dicho, la aplicación de esta teoría al caso de un sistema homogéneo, isótropo y plano.

Esto es lo que hizo por primera vez el físico y matemático soviético Alexander Friedmann en 1922, basándose en trabajos anteriores del físico y sacerdote belga Georges Lemaître, del físico y matemático estadounidense Howard P. Robertson y del matemático británico Arthur Geoffrey Walker. Para hacer justicia a todos ellos, el modelo de la cosmología que resulta de aplicar la relatividad general a un universo homogéneo, isótropo y plano se denomina modelo de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker. Sus ecuaciones describen la evolución temporal del *factor de escala* del universo en términos de su densidad de masa y la famosa constante cosmológica. El factor de escala es una medida del tamaño del universo. Dependiendo de los valores de la densidad, la constante cosmológica y la posible curvatura, el factor de escala cambia de diversas maneras.

Hay una última propiedad del universo fundamental para entender su evolución. Nos referimos a su expansión: los objetos que pueblan el cosmos se alejan entre sí. Conviene aclarar que la palabra «expansión» no es la más acertada, a pesar de ser la más común. El verbo que mejor describe lo que realmente hace el universo es «estirarse».

La diferencia entre expandirse y estirarse es que hablar de un universo en expansión evoca la imagen de un puñado de galaxias flotando en el espacio, habiéndose creado todas ellas en algún punto central respecto del cual se están alejando. Sin embargo, esto no es lo que conocemos hoy día sobre el universo. Las galaxias simplemente están «posadas» en el espacio: no se mueven por el

espacio de la misma forma que lo hace una pluma por el aire. Lo que sucede es que, a medida que pasa el tiempo, el espacio entre las galaxias se estira, algo así como lo que pasa al tirar de ambos extremos de una goma. Si bien las galaxias no se han movido a través del espacio, sí que se alejan entre sí con el tiempo porque el espacio entre ellas se ha estirado.

El problema con la imagen del universo en expansión es que refleja una visión absoluta, fija del espacio. Pero, como hemos recalcado reiteradamente, la relatividad general nos enseña que el espacio (en realidad, el espacio-tiempo) es un objeto dinámico, en interacción con el resto de los elementos del universo. Por tanto, puede curvarse y estrecharse. La mejor analogía para entender este estiramiento del universo la introdujo el genial Martin Gardner, filósofo y escritor estadounidense de ciencia y matemáticas recreativas, en su libro de 1962 *Teoría de la relatividad de millones*. En él, Gardner sugería que se pensase en el universo como una gigantesca cantidad de masa de cocina. En ella incrustamos un puñado de pasas, distribuidas por toda la masa. Aquí, la masa representa el espacio y las pasas, las galaxias. No conocemos el tamaño de la masa: todo lo que sabemos es que es muy grande, de modo que, sentados sobre alguna de estas pasas, estamos tan lejos del borde que, de existir, no tiene efecto alguno sobre nosotros ni sobre lo que vemos. A continuación, alguien mete la masa en el horno y empieza a crecer. Las pasas se alejan entre sí, pero en relación con la masa no se mueven en absoluto: las mismas partículas de masa que empezaron cerca de una pasa dada siempre estarán cerca de dicha pasa. En este mismo sentido, las galaxias no se desplazan por el espacio cuando el universo se expande: las pasas

no se mueven a través de la masa, pero la distancia entre las pasas sí que aumenta.

Para verlo, supongamos que nos hacemos con una cinta métrica colosal. Enganchamos su punta en una galaxia lejana y volvemos a la nuestra, sujetando bien la cinta. A medida que la galaxia se aleja, tirará de la cinta métrica, de forma que podemos leer fácilmente las distancias mientras se desenrolla la cinta: mil millones de años-luz, dos mil millones de años-luz, etc. ¿Correcto? ¡No! Esto es lo que sucede en el caso ordinario de expansión, con un espacio fijo e inalterable. Con nuestro símil de la masa y las pasas en mente, lo que realmente sucede es que la cinta métrica nunca se desenrollará mientras el universo se expande, porque las galaxias no se mueven entre sí. La cinta métrica siempre marcará, digamos, mil millones de años-luz. Parece, pues, que la distancia entre las galaxias no ha cambiado. ¿Pero no habíamos quedado antes en que la distancia entre las pasas sí crecía? Sí, y el motivo es el siguiente: cuando traemos de vuelta la cinta de la galaxia lejana, nos damos cuenta de que, debido al estiramiento del espacio, la cinta también se ha estirado, de modo que si la comparamos con una cinta idéntica que ha estado en nuestro bolsillo todo el rato, veremos que todas las divisiones en la cinta que hemos traído están, pongamos, el doble de espaciadas que las mismas divisiones de la cinta del bolsillo. Si tomamos como referencia esta cinta, que no se ha movido del bolsillo, diríamos que la galaxia lejana está a dos mil millones de años-luz de distancia, incluso si la primera cinta indicaba solo mil millones de años-luz. Vemos que el concepto de distancia es más complicado en el contexto de la relatividad general. No está claro si el universo como un todo se está ex-

pandiendo: todo lo que realmente medimos es el estiramiento del espacio entre cada par de galaxias.

Antes de concluir esta discusión sobre la expansión del universo, merece la pena resolver una pregunta que suele causar confusión. ¿Sobre qué se expande el universo? En el caso de un espacio fijo, la respuesta es simple: el conjunto de galaxias que conforman el universo se mueven a través del espacio, por lo que el universo se expande, literalmente, sobre un espacio mayor del que ya abarcaba. Por el contrario, en nuestro símil, las galaxias son solo pasas distribuidas por la masa. La cuestión clave es si esta masa tiene un borde.

Si la masa tiene borde, entonces tiene sentido, en principio, preguntarse qué hay más allá de tal borde, pues sobre ese «qué» se expande tal masa. Ahora bien, ese borde de la masa representa el borde del espacio. Nosotros (y todo lo que conocemos) vivimos dentro de ese espacio, ¡y no tenemos forma de dejarlo atrás! En otras palabras, no creemos que exista manera alguna de observar o medir lo que está más allá del borde, a menos que tuviese algún efecto sobre nosotros que desconocemos hasta ahora. Lo más honesto es decir que simplemente no tenemos ni idea sobre lo que hay en ese hipotético «más allá del borde». Según nuestro conocimiento actual, el universo no tiene borde alguno: o es infinito o se envuelve a sí mismo de alguna forma. Las observaciones corroboran la afirmación anterior, en el sentido de que si de verdad existe un borde del universo, tal borde está tan lejos de nosotros que no lo podemos observar, ni tampoco tiene ningún efecto sobre nosotros.

Por último, si el universo realmente es infinito, entonces la respuesta es que no hay nada sobre lo que pueda expandirse. Pensar

en el infinito siempre es difícil, pero consideremos una sucesión de números: 1, 2, 3,... hasta infinito. Ahora multiplicamos por dos cada número de tal sucesión, obteniendo: 2, 4, 6,... hasta infinito otra vez. La distancia entre dos números consecutivos de la lista se ha estirado (ahora es 2 en vez de 1), pero ¿tiene sentido decir que el «tamaño» total de todos los números se ha expandido? Al fin y al cabo, empezamos con números que llegaban a infinito, y terminamos con otros números que también llegan a infinito. ¡Así que el tamaño es el mismo! Si estos números representan las distancias entre galaxias en un universo infinito, entonces es una buena analogía para ilustrar que no es necesario que el universo se expanda aunque sí se estire.

Debido a este estiramiento del espacio, los cosmólogos de la primera mitad del siglo XX se preguntaron si sería posible deducir la edad del universo. Para ello, consideraron su evolución hacia atrás en el tiempo. Su razonamiento era que al rebobinar la película, el espacio se acortaría más y más, hasta un tiempo en el pasado en el que todas las galaxias, toda la masa, de hecho, el universo entero, se reduciría a un único punto, donde la densidad, la temperatura y la curvatura serían infinitas. A una región del espacio-tiempo donde la curvatura es infinita se la denomina *singularidad*, que se puede concebir como un pozo de profundidad infinita, donde la pared del pozo es el espacio-tiempo curvado. Por tanto, esta singularidad habría de ser el momento del origen del universo. Y para explicar el porqué de su estiramiento, pensaron que el universo se habría formado como resultado de una gigantesca explosión en aquel instante de tiempo. Y así acuñaron el término *Big Bang* («gran explosión») para referirse al dramático acontecimiento que tuvo lugar en ese momento y que desencade-

nó la ulterior evolución del universo. El Big Bang también se conoce como «singularidad inicial». Según los cálculos, el Big Bang tuvo lugar hace unos catorce mil millones de años. Pero hay un problema. Las ecuaciones que se usaron para obtener el Big Bang fueron las de la relatividad general (en particular, las ecuaciones de Friedmann), una teoría que ignora los efectos cuánticos. El problema es que, en su infancia más tierna, poco después de ese hipotético Big Bang, el universo era muy, muy pequeño. Y el microcosmos es territorio cuántico. En otras palabras, al rebobinar la evolución del universo, los cosmólogos asumieron que los efectos cuánticos se podían obviar de manera indefinida, incluso en las fases donde su tamaño era muy pequeño, hasta llegar al momento cero. Pero ¿es válida esta hipótesis? Difícilmente. Para verlo, repasemos lo que conocemos sobre el pasado del universo.

El llamado modelo estándar de la cosmología es la mejor descripción que tenemos sobre la evolución del cosmos. Predice de manera satisfactoria las principales propiedades del *fondo cósmico de microondas*, una especie de ruido cósmico que se extiende por todo el universo, remanente de las primeras fases de este. Más concretamente, es la radiación térmica liberada una vez que los fotones pudieron viajar libremente por el universo. Además, también predice con éxito la nucleosíntesis, esto es, la formación de núcleos ligeros como el hidrógeno y el helio, entre otros, así como las abundancias relativas de estos, lo que es crucial en la formación de estrellas y demás estructuras complejas.

Un ingrediente esencial en este modelo es la *inflación cósmica*, la idea de que el universo experimentó una expansión extremadamente rápida en algún momento de sus primeras etapas. La inflación cósmica fue propuesta en la década de 1980 por los cosmólo-

gos estadounidenses Alan Guth, Andreas Albrecht, Paul Steinhardt y Andrei Linde (este último de origen soviético) para resolver dos puzles en el modelo del Big Bang. El primero es determinar por qué el universo observable parece ser tan plano (curvatura casi nula). El segundo es precisamente explicar la existencia del fondo cósmico de microondas, que muestra que regiones del universo muy distantes entre sí exhiben correlaciones en sus temperaturas, lo que sugiere que alguna vez interactuaron entre sí. La solución que ofrece la inflación cósmica a estos dos interrogantes es suponer que, durante una fase temprana de la evolución del universo, su volumen creció vertiginosamente en un factor de ¡10^{24} en menos de 10^{-24} segundos! La idea es que durante esta fase inflacionaria las fluctuaciones cuánticas del vacío, unos 10^{-36} segundos después del supuesto Big Bang, produjeron fluctuaciones de la densidad, que sirvieron como «semillas» de las estructuras que existen en la actualidad. Dado que tales fluctuaciones de la densidad implicaron, a su vez, fluctuaciones en la temperatura, dejaron una huella observable en el fondo cósmico de microondas. Las medidas de las propiedades de dicho fondo concuerdan muy bien con las predicciones del modelo inflacionario.

Sin embargo, este modelo tiene sus propias deficiencias. Si rebobinamos aún más la historia del universo, alcanzamos la fase en la que fue tan denso y caliente que deja de tener sentido la teoría sobre la que se basa el modelo inflacionario, que no es otra que la relatividad general. En esta fase, llamada *era de Planck*, que se extiende desde el inicio de la inflación hasta un *segundo de Planck* (unos 10^{-43} segundos) después de la supuesta singularidad inicial, la gravedad habría alcanzado una intensidad comparable a la del resto de fuerzas, ya que, recordemos, toda la masa del universo se

concentraba en un volumen muy pequeño, y cuanto menores sean las distancias, más intensa es la gravedad. Pero precisamente el hecho de que el universo tuviese un tamaño subatómico exige tener en cuenta los efectos cuánticos. Por tanto, estamos en la fase donde gobierna la naturaleza cuántica de la gravitación. Esta es la fase de la geometría cuántica descrita en el capítulo anterior.

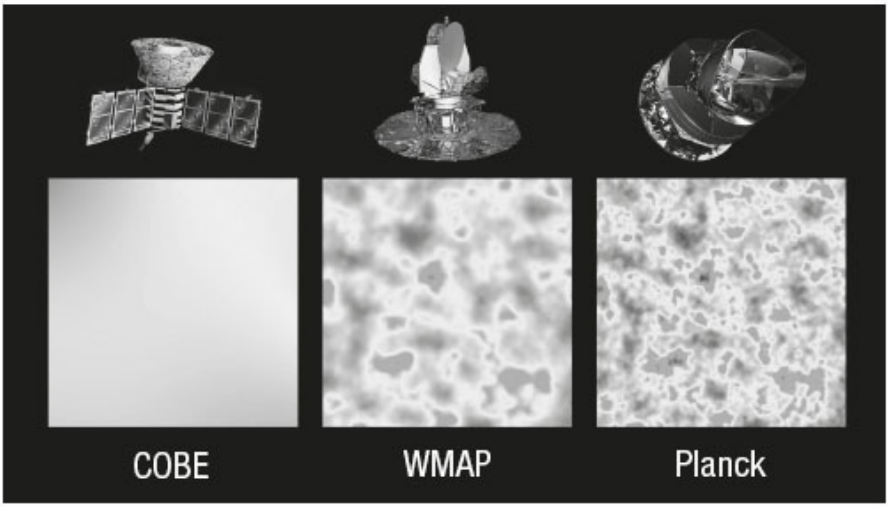
Cuando nuestros telescopios apuntan hacia el espacio profundo se adentran en el pasado remoto. En efecto, dado que para observar cualquier objeto es necesario que la luz llegue a nuestros ojos, y dado que la velocidad de la luz es finita, enorme para nosotros, pero finita, cuanto más lejos se halle una fuente de luz, digamos un cúmulo de galaxias, más tiempo tardará esa luz emitida en ser captada por los detectores de nuestros telescopios. Por tanto, escudriñar el espacio profundo significa explorar el pasado remoto del cosmos. Lo más lejos que hemos sido capaces de observar hasta la fecha, es decir, la etapa más primitiva del universo sobre la que existen datos observacionales es la obtenida por las misiones COBE (siglas en inglés de Explorador del Fondo Cósmico) y WMAP (Sonda Wilkinson de Anisotropías de Microondas) de la NASA, y la misión Planck de la ESA (Agencia Espacial Europea). Por ese orden, cada misión ha mejorado la precisión de las medidas de la antecesora, hasta los últimos resultados publicados por Planck en 2013 (véase la imagen superior de la página contigua).

La imagen del universo en esta etapa remota corresponde a la mostrada en la parte superior de la figura 1, donde se exhiben las fluctuaciones o anisotropías en la temperatura en el fondo cósmico de microondas, que fueron las semillas que eventualmente originaron las galaxias y demás estructuras complejas. Esta época, insistimos, la más remota sobre la que tenemos observaciones,

muestra cómo era el universo unos 375000 años después de lo que quiera que originase su expansión hace unos 13770 millones de años. Conviene aclarar ese «lo que quiera». Precisamente porque no sabemos qué pasó antes de la etapa observada por las misiones mencionadas, no podemos saber qué es lo que causó la aparición del universo, ni cuál es su edad, ni siquiera si realmente tuvo un principio. Aquí es donde la popular idea del Big Bang no arroja más que confusión. La frase siguiente debe quedar cristalinamente clara: no existe evidencia observacional alguna de ninguna singularidad inicial que diese lugar al universo. De lo que sí existe evidencia es de que cualquiera que fuese su origen, el universo era extremadamente caliente y denso en su infancia, y se ha estado estirando y enfriando desde entonces. Esto, y no el Big Bang, es lo que COBE, WMAP y Planck han corroborado cada vez con mayor precisión. No es solo que la hipótesis de una singularidad inicial no sea la única, sino que es la menos verosímil, pues, como hemos explicado, sencillamente ignora los efectos cuánticos de la gravitación en las etapas más primitivas del cosmos. El modelo inflacionario, según el cual el colosal incremento en el tamaño del universo ocurrió antes de la etapa observada por las misiones citadas, es un modelo muy plausible no solo porque sus predicciones concuerdan extraordinariamente bien con las observaciones, sino también porque esa etapa inflacionaria se supone que tuvo lugar una vez que la geometría cuántica se pudiese obviar. En otras palabras, la inflación cósmica, al contrario que la idea del Big Bang, no ignora la mecánica cuántica por capricho, sino porque en esa fase los efectos cuánticos de la gravitación sí eran despreciables.

Pero hemos dejado sin aclarar un aspecto fundamental. Si eli-

minamos el Big Bang de la película, ¿qué significa que la imagen del satélite Planck muestra cómo era el universo unos 375000 años después de lo que quiera que originase su expansión hace unos 13770 millones de años? Hemos descartado la singularidad inicial, pero ello no implica que no haya una fase que sirva de referencia temporal. Analicemos ahora una de las propuestas para tal fase.



Arriba se puede apreciar cómo han evolucionado los satélites diseñados para detectar radiación procedente de las primeras fases del universo, y cómo ha mejorado su resolución. La imagen inferior muestra el lanzamiento del satélite Planck a bordo del cohete Ariane 5, en mayo de 2009.

¿Cuáles son las condiciones del universo antes de la inflación cósmica? ¿Hasta qué punto afectan tales condiciones a las predicciones del modelo inflacionario? La respuesta a estas preguntas fundamentales tendrá que esperar hasta que tengamos una teoría completa de la gravedad cuántica. Pero sí es posible sacar algunas conclusiones. Para ello, los físicos teóricos de la gravedad cuántica de bucles han aplicado esta teoría a la cosmología. El resultado es la conocida como —¡no podría ser de otra manera!— cosmología cuántica de bucles, que el grupo de Abhay Ashtekar ha usado para extender el modelo inflacionario hasta la era de Planck.

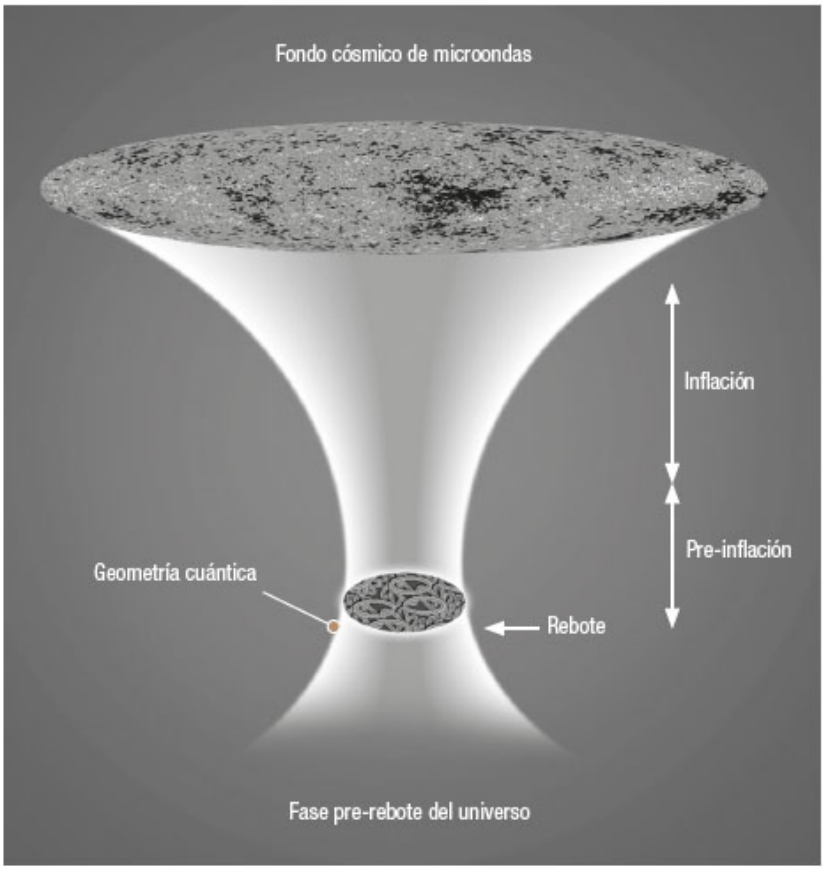
Cuando los átomos de espacio-tiempo o redes de espines que forman la geometría cuántica poseen una curvatura significativa,

la cosmología cuántica de bucles predice un fenómeno curioso: al rebobinar su historia, el universo nunca alcanza singularidad inicial alguna, sino que se topa con un «gran rebote» que hace que no siga contrayéndose más y empiece a estirarse de nuevo (figura 1). En otras palabras, según la cosmología cuántica de bucles, el universo no empezó en un Big Bang a partir de la nada: la historia del universo es la de sucesivas oscilaciones entre fases de estiramiento y contracción, sin alcanzar jamás ninguna singularidad. Así, nos encontramos viviendo en la fase de estiramiento de una de tales oscilaciones. Según este modelo, la imagen de la misión Planck muestra cómo era el universo unos 375000 años después de este gran rebote que originó su estiramiento hace unos 13770 millones de años.

Para tratar de entender de dónde viene este gran rebote, recordemos que estamos en la fase de la gravedad cuántica, donde la densidad de energía del universo es descomunal, puesto que su volumen es ínfimo. Una analogía con la física atómica es ilustrativa. Imaginemos un electrón alrededor del núcleo, en uno de los niveles de energía atómicos. Según la física newtoniana, el electrón debería caer, bajo ciertas circunstancias, en el núcleo atómico. Pero no lo hace. Este hecho llevó a Bohr a proponer su modelo atómico, según el cual las «órbitas» electrónicas alrededor del núcleo no pueden estar a cualquier distancia de este: solo algunas están permitidas. El motivo por el que el electrón no cae al núcleo es una consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg: confinar al electrón en el núcleo, que es una región ridículamente pequeña, implica que su momento lineal se hace muy grande, por lo que el electrón tiene demasiada velocidad y logra escaparse de su confinamiento nuclear (recordemos la carga de

prueba del primer capítulo). Algo parecido sucede en el caso del universo en la era de Planck. Solo que ahora no es un electrón, sino el universo mismo. La posibilidad de alcanzar la singularidad inicial es solo una consecuencia de llevar la teoría clásica (en este caso, la relatividad general) más allá de su rango de validez. Cuando se considera la mecánica cuántica, al tratar de concentrar un universo con una densidad de energía colosal en un volumen minúsculo, el principio de incertidumbre prohíbe que el universo siga contrayéndose, confinándose más, puesto que su momento lineal, el del universo entero, se hace demasiado grande para retener el universo en una región tan pequeña, de modo que logra escapar de la supuesta singularidad inicial, que hace el papel del núcleo de la analogía atómica anterior. Pero enfaticemos que esta singularidad inicial, al contrario que el núcleo atómico, no existe. El universo jamás llega a tener un volumen nulo en este escenario.

FIG. 1



El pasado remoto del universo. La figura muestra la historia del universo desde la etapa más remota que hemos podido observar, el fondo cósmico de microondas, hasta la época de la geometría cuántica.

Las predicciones de la cosmología cuántica de bucles coinciden con las del modelo inflacionario normal, es decir, sin gran rebote, para un conjunto bastante amplio de condiciones iniciales, esto es, las condiciones del cosmos en el instante de dicho gran rebote. No obstante, para ciertas condiciones iniciales, las predicciones de la cosmología cuántica de bucles se desvían ligeramente, lo que

podría manifestarse a través de medidas de alta precisión del fondo cósmico de microondas.

Sin embargo, conviene dejar patente que el origen de este gran rebote no está completamente claro, ya que no tenemos una teoría completa de la gravedad cuántica que describa de manera satisfactoria las fluctuaciones cuánticas de la geometría del espacio-tiempo, que se suponen importantes en esta era de Planck. En particular, el mero hecho de hablar de una fase de contracción «anterior» que rebota dando lugar a una fase de estiramiento «posterior», que es la manera intuitiva de entender la evolución del universo según la cosmología cuántica de bucles, quizá sea demasiado simplista, ya que el espacio-tiempo mismo deja de tener sentido en la era de Planck. Resumiendo, la cosmología cuántica de bucles elimina el Big Bang y lo sustituye por el Gran Rebote, que marca la etapa de estiramiento del universo en la que nos encontramos ahora. Lo que pasase «antes» de dicho gran rebote es terreno de la especulación. La respuesta más acorde con la cosmología cuántica de bucles, pero que es seguramente incompleta, es que la historia del cosmos es una sucesión constante de oscilaciones entre fases de estiramiento y contracción, por lo que el universo, como un todo, no habría tenido principio ni tendrá final.

EL GRAN REBOTE

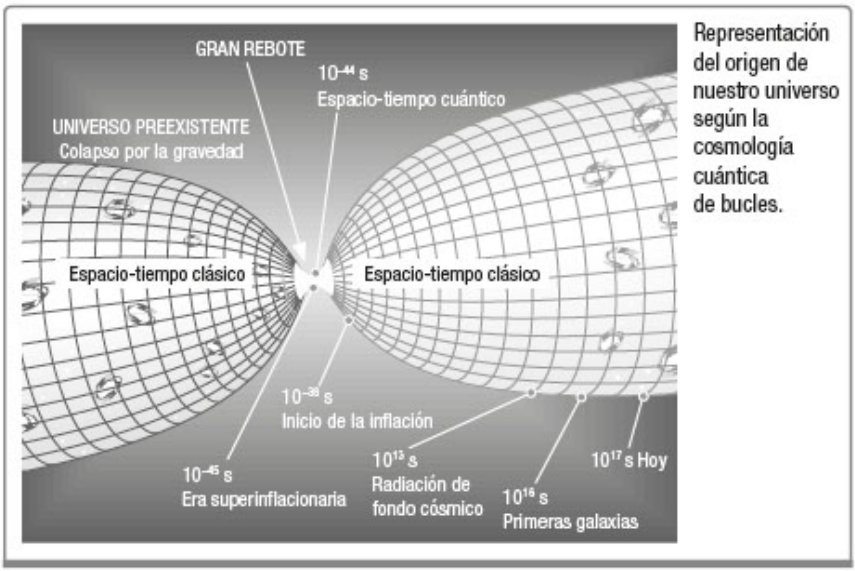
La cosmología cuántica de bucles predice la versión cuántica de la ecuación de Friedmann: *!a*

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho\left(1-\frac{\rho}{\rho_c}\right),$$

donde *!a* es la variación temporal del factor de escala, *a*, *G* es la constante de Newton, ρ es la densidad de masa del universo y ρ_c es la llamada *densidad de materia crítica*, el valor de la densidad de materia del universo que marca el umbral entre el estiramiento y la contracción: si $\rho>\rho_c$ la gravedad ejercida entre los cúmulos de galaxias y demás estructuras muy masivas contrarresta el estiramiento, de modo que el universo empieza a contraerse. Por el contrario, si $\rho< \rho_c$, el estiramiento prosigue indefinidamente.

De la contracción al estiramiento

La versión cuántica de la ecuación de Friedmann sí permite que *!a* cambie de signo, dependiendo del valor relativo de la densidad respecto de la densidad crítica. En particular, si la densidad de materia es superior a la densidad crítica, $\rho > \rho_c \rightarrow !a < 0$, tenemos un universo en contracción. Es posible llegar a una fase en la que primero las dos densidades coincidan, $\rho = \rho_c \rightarrow !a = 0$, y si seguimos hasta etapas aún más primitivas, alcanzar la fase donde $\rho < \rho_c$ y, por tanto, $!a > 0$: las «trayectorias» de un universo en contracción pasan a ser «trayectorias» de un universo en estiramiento. Este es el «gran rebote» que impide que se alcance la singularidad inicial.



Representación del origen de nuestro universo según la cosmología cuántica de bucles.

PREDICIENDO EL COMPORTAMIENTO DE LOS AGUJEROS NEGROS

Uno de los objetos más fascinantes predichos por la relatividad general es el agujero negro, una suerte de desagüe cósmico. Según la teoría de Einstein, la gravedad (equivalentemente, la curvatura del espacio-tiempo) en el interior de un agujero negro es tan intensa que nada consigue escapar, de ahí la idea de «agujero». Ni siquiera la luz, de ahí el calificativo de «negro». En otras palabras, un agujero negro no refleja nada de radiación.

Esta situación guarda una gran semejanza con el caso de un cuerpo negro. Como vimos al inicio del primer capítulo, un cuer-

po negro es un objeto idealizado que absorbe toda la radiación que le llega. Ahora bien, cuando un cuerpo negro se halla en equilibrio térmico con su entorno, es decir, posee una temperatura constante, se produce un flujo de energía en forma de radiación que viene dada por la distribución de Planck, cuya principal característica es que el espectro de la radiación emitida solo depende de la temperatura. El adjetivo «negro» no se refiere tanto a que no emita nada de radiación como al hecho de que la mayor parte de esta es invisible para el ojo humano. En efecto, si colocamos un cuerpo negro a temperatura ambiente, la mayoría de la radiación que emite está en el infrarrojo, de ahí que nos parezca negro.

¿Sería posible que este también fuese el caso de un agujero negro? ¿Podría ser que nos pareciese «negro» simplemente porque no vemos la radiación que emite? No, según Einstein. Pero su teoría de la relatividad general es clásica, no tiene en cuenta la mecánica cuántica. ¿Podría ese «no» convertirse en un «sí» una vez que se considerasen los efectos cuánticos? Este problema es el que estudió en la década de 1970 el célebre físico inglés Stephen Hawking, con unos frutos sorprendentes: los agujeros negros están calientes, esto es, tienen una temperatura no nula que depende inversamente de su masa. Y como un cuerpo negro en equilibrio térmico con su entorno, los agujeros negros sí emiten radiación. Para ello, Hawking analizó el problema en el marco de la gravedad semiclásica, que consiste en estudiar materia cuántica en un campo gravitatorio clásico descrito por la relatividad general. En nuestro caso, dicho campo es el asociado al agujero negro.

Para explicar el origen de esta radiación, los libros de divulgación suelen emplear la situación siguiente: en las cercanías del horizonte de sucesos del agujero negro se crean y aniquilan pares

partícula-antipartícula, de forma que, de vez en cuando, una de ellas se «cae» al agujero, esto es, cruza el horizonte de sucesos, por lo que su compañera queda libre para escaparse. Para un observador lejos del agujero negro, es como si este emitiese radiación. Este «como si» es crucial. En nuestra modesta opinión, esta explicación de la radiación de un agujero negro, que, por otro lado, no parece tener ninguna relación con el trabajo original de Hawking, es insatisfactoria. El lector seguramente se preguntará por qué se dice que esa partícula que escapa es emitida por el agujero negro, cuando la realidad es que nunca ha formado parte de él. Solo tuvo más suerte que su compañera.

Por ello, pensamos que es más ilustrativo explicar el origen de la radiación de un agujero negro siguiendo las ideas que condujeron a Hawking a su hallazgo. Antes, es conveniente describir un fenómeno bastante similar pero algo más sencillo, pues, al contrario que la radiación de un agujero negro, se produce en un espacio-tiempo plano.

Y tú ¿cuántas partículas ves?

Supongamos la situación siguiente. Una chica y un chico deciden hacer un pequeño experimento. Ella se monta en un avión; él se queda en tierra. El chico coloca dos cajas de gran tamaño en una pradera. Aunque no es muy realista, en aras de la claridad de la explicación, consideremos que en una de ellas introduce un puñado de átomos; en la otra, ninguno. Cuando el avión ha alcanzado suficiente altura y viaja con aceleración constante, el chico contacta con nuestra piloto para preguntarle qué ve en cada caja. La chica saca unos potentes binoculares, equipados con un vanguardista microscopio electrónico incorporado, y los apunta a la pradera. Cuando informa al chico, este se queda estupefacto: la

chica ha visto dos cajas… ¡llenas de átomos! Pero ¿no había una vacía? ¿Cómo puede ser que el chico, en tierra, vea una de las cajas vacía y la chica, en el aire, ninguna? La clave está en la aceleración del avión. En relatividad especial, dos observadores inerciales, es decir, en movimiento uniforme relativo, están relacionados mediante las transformaciones de Lorentz, de manera que están de acuerdo en el número de objetos que ambos ven (átomos, en nuestro ejemplo). En particular, ninguno verá objetos donde el otro no ve nada. Pero en el caso de observadores no inerciales, esto es, en movimiento relativo acelerado, la situación cambia: recordemos que la relatividad general afirma que un observador en movimiento acelerado experimenta los mismos efectos que si estuviese en el seno de un campo gravitatorio, y la gravedad no es más que la curvatura del espacio-tiempo. Y, en esta situación, el mero concepto de vacío no es único: depende del observador. Este fenómeno es completamente cuántico, de ahí que hayamos hablado de átomos, pese a sonar poco realista.

Esta es la esencia del fenómeno conocido como *efecto Unruh*, descubierto por el físico canadiense William G. Unruh en 1976. El efecto Unruh implica que un observador en movimiento acelerado respecto del vacío de un espacio-tiempo plano, denominado también *vacío de Minkowski*, ve un haz de partículas con un espectro que obedece la distribución de Planck para un cuerpo negro. En otras palabras, dados dos observadores, uno inercial respecto del vacío de Minkowski y otro no inercial, el efecto Unruh predice que, si bien el observador inercial no verá partícula alguna, el no inercial observará un flujo de partículas siguiendo la distribución de Planck. En particular, la temperatura del haz de partículas visto

por el observador no inercial es proporcional a la aceleración respecto del vacío.

Los agujeros negros no son tan negros

El efecto Unruh nos permite entender de forma bastante sencilla la radiación emitida por un agujero negro. Imaginemos un observador estático cerca de un agujero negro con simetría esférica, cuya única magnitud relevante es su masa. Si el observador se sitúa muy próximo al horizonte de sucesos del agujero negro, el espacio-tiempo que ve es prácticamente plano. Esto es análogo al caso de caminar una distancia sobre la superficie de la Tierra mucho menor que su circunferencia: a efectos prácticos, la superficie nos parece plana. En estas condiciones estamos esencialmente en la situación del efecto Unruh: el observador estático corresponde a uno en caída libre (aceleración constante) cerca del horizonte de sucesos en un espacio-tiempo plano. Por tanto, respecto del vacío de Minkowski, nuestro intrépido explorador verá un flujo de partículas con una temperatura proporcional a su aceleración respecto de dicho vacío.

Supongamos ahora una observadora, esta vez a una distancia segura del agujero negro. En este caso, la aproximación plana ya no sirve (en el caso de la superficie terrestre, sería recorrer una distancia comparable a la longitud de la circunferencia). Ahora bien, debido al estiramiento del universo, la radiación observada por nuestro primer observador cerca del horizonte de sucesos sufrirá el famoso *efecto Doppler*, según el cual cambia la frecuencia de la radiación o el sonido medida por un observador en reposo cuando la fuente se mueve respecto de él: la frecuencia crece si la fuente se acerca y disminuye si se aleja. Por este motivo, en astrofísica se habla del *desplazamiento hacia el rojo* de la radiación pro-

cedente de otras regiones del cosmos: debido al estiramiento, la fuente (galaxia, por ejemplo) se aleja de nosotros, por lo que la frecuencia de la radiación disminuye. Y el rojo es el tipo de radiación del espectro visible con menor frecuencia. Esto solo es una forma de hablar, pues, obviamente, la frecuencia puede ser menor que la del rojo.

Con todo, nuestra observadora ubicada muy lejos del agujero negro verá que la temperatura del flujo de partículas visto por el observador cerca del agujero negro habrá cambiado cuando dicho flujo llegue a ella, de modo que mide un flujo con un espectro térmico dado por una temperatura proporcional a la gravedad en la superficie del horizonte de sucesos. Esta radiación es la llamada *radiación de Hawking*. Conviene aclarar el origen de esta radiación. La clave está en el concepto relativo de vacío: un observador en caída libre respecto del vacío de Minkowski ve un haz de partículas, y lo mismo sucede con un segundo observador situado muy lejos del agujero negro. La única diferencia entre ellos es el valor de la temperatura de tal haz.

El descubrimiento de Hawking de la temperatura de los agujeros negros, en particular el carácter térmico de la correspondiente radiación de Hawking, permitió a los físicos buscar de manera sistemática una relación entre los agujeros negros y la termodinámica, pues el trabajo del físico inglés otorgaba credibilidad a una idea propuesta un par de años antes. De hecho, el propio Hawking era escéptico sobre tal idea, por lo que decidió atacar el problema para zanjar el asunto. La idea en cuestión la había propuesto el físico israelí-estadounidense Jacob Bekenstein en 1972, según el cual los agujeros negros tenían entropía, una magnitud termodinámica que mide la imposibilidad de convertir la energía

térmica de un sistema físico en trabajo mecánico útil. Para entender el concepto, imaginemos el agua de un océano. La masa de agua no es más que una cantidad ingente de moléculas agitadas. Esta agitación molecular genera calor, que se traduce a escala macroscópica (muchas, muchas moléculas) en lo que llamamos temperatura. Por tanto, el agua del océano tiene una cierta temperatura, que equivale a energía térmica. El problema es que no es posible usar toda esa energía térmica para realizar trabajo útil (mover las turbinas de una central hidroeléctrica, por ejemplo). Este obstáculo se conoce desde hace siglos. De hecho, dio muchos dolores de cabeza a aquellos que pretendían construir el *perpetuum mobile*, una máquina que realizaría trabajo de manera indefinida sin necesidad de proporcionarle energía. En la práctica, esto no es posible debido a la fricción y otros procesos que disipan la energía. En nuestro ejemplo, el rozamiento de las turbinas con el agua genera calor por fricción, de modo que se disipa energía al entorno, energía que no se puede utilizar. El principio en cuestión es la conocida como segunda ley de la termodinámica, que afirma que la entropía total de un sistema aislado siempre aumenta, lo que significa que los procesos físicos son irreversibles, es decir, solo pueden darse en un sentido. La asimetría temporal entre pasado y futuro es un claro ejemplo de ello.

El razonamiento de Bekenstein fue el siguiente: si nos imaginamos lanzando un objeto al interior de un agujero negro, con él perdemos su entropía, de modo que, para un observador externo al agujero negro, la entropía del universo parece disminuir, contradiciendo la segunda ley de la termodinámica. Por ello, Bekenstein postuló que había que tener en cuenta al agujero negro en dicha ley, proponiendo una versión generalizada según la cual

la entropía total del universo es igual a la suma de la entropía de todos los agujeros negros y la entropía externa a ellos. Así, la entropía del objeto arrojado al interior del agujero negro pasa a formar parte de la entropía de este, de modo que la entropía total no disminuye.

Basándose en un teorema de Hawking, que afirmaba que el área del horizonte de sucesos de un agujero negro no decrece con el tiempo, Bekenstein postuló que la entropía de un agujero negro era proporcional a tal área, en clara analogía con la segunda ley. Como hemos dicho, Hawking se mostró escéptico al principio, ya que, según la relatividad general, un agujero negro no puede emitir radiación y, por lo tanto, no puede tener entropía. Pero el trabajo que le llevó al hallazgo de la radiación de Hawking dio la razón a Bekenstein. Si un agujero negro posee temperatura, entonces ha de tener también entropía, conocida como la entropía de Bekenstein-Hawking de un agujero negro. Lo esencial es saber que esta entropía es proporcional al área del horizonte de sucesos.

La expresión de la entropía de un agujero negro es fascinante, pues incluye la física estadística, la relatividad (especial y general) y la mecánica cuántica. No en vano, desde su descubrimiento se la considera como un test que cualquier teoría fundamental debe pasar. En el siguiente apartado veremos brevemente cómo la gravedad cuántica de bucles lo supera con éxito.

Contando los estados cuánticos de un agujero negro

En la gravedad cuántica de bucles existen dos vías para la derivación de la fórmula de la entropía de Bekenstein-Hawking. Expondremos brevemente ambos casos, y veremos que representan el mismo proceso.

La primera línea de ataque consiste en contar el número de estados sobre el horizonte de sucesos del agujero negro. En este caso, se supone que un observador externo al horizonte no tiene acceso a nada de lo que pasa al otro lado. Por tanto, para él, el agujero no es más que una superficie bidimensional, su horizonte de sucesos, que evoluciona en el tiempo. Por simplicidad, consideremos un agujero negro esférico que no rota y eléctricamente neutro. En equilibrio, tenemos una superficie esférica con un área dada. En el ámbito cuántico, las relaciones de incertidumbre de Heisenberg asociadas a la posición y el momento lineal hacen que el horizonte «sea sacudido».

Para calcular la entropía basta con contar el número de microestados con una cierta energía. Recordemos que la entropía es una medida de la imposibilidad de convertir energía térmica en trabajo útil. Un estado macroscópico cualquiera se puede entender como una superposición de microestados cuánticos, cada uno de ellos con una probabilidad dada de existir, de forma que el conjunto de estos microestados que realmente corresponden al estado macroscópico tienen probabilidad máxima. Así, la entropía no es más que la pérdida de información acerca del sistema al pasar del ámbito cuántico, microscópico, al clásico, macroscópico. Por tanto, en nuestro caso ello equivale a contar el número de estados de una superficie bidimensional, el horizonte de sucesos, con un área dada, puesto que el área del horizonte determina la energía medida en las cercanías del mismo.

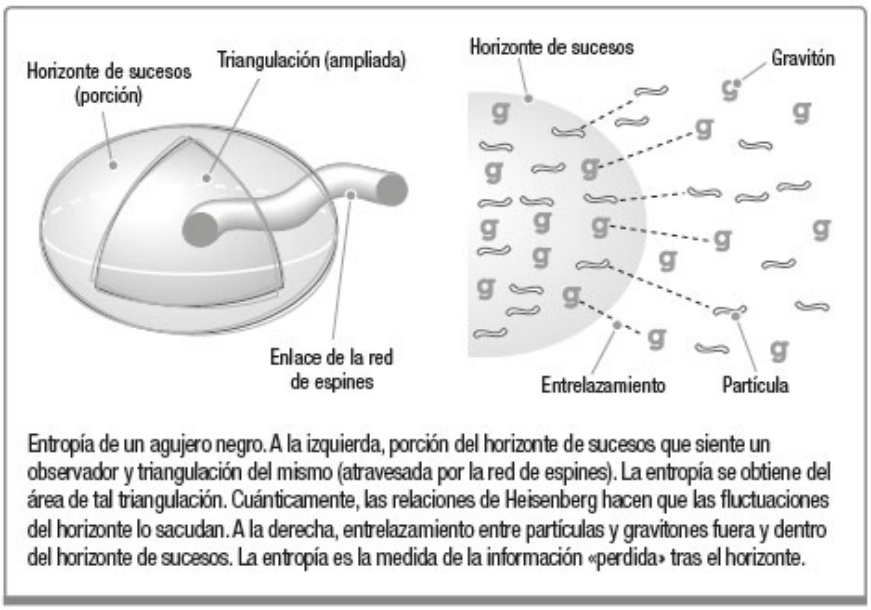
ENTROPÍA DE BEKENSTEIN-HAWKING

La fórmula para la entropía de un agujero negro [1] fue propuesta heurísticamente por Bekenstein y calculada por Hawking poco después. En ella, A es el área del horizonte, h la constante de Planck reducida, G la constante de la gravitación universal, c la velocidad de la luz en el vacío y k_gB la constante de Boltzmann. La gravedad cuántica de bucles ofrece dos maneras complementarias de obtener es-

ta fórmula: mediante «sacudidas» del horizonte de sucesos debido a sus fluctuaciones cuánticas, y a través del entrelazamiento entre campos dentro y fuera de dicho horizonte. Si consideramos un esquema híbrido, tenemos la expresión [2], donde λ es un parámetro adimensional que depende de cómo atraviesan las redes de espines el horizonte de sucesos, y γ es el parámetro de Barbero-Immirzi.

$$S_{BH} = \frac{k_B c^3}{4\hbar G} A \quad [1] \qquad S_{BH} = \frac{A}{4\hbar G} + \lambda \sqrt{\frac{A}{\gamma \hbar G}} \quad [2]$$

En la expresión [2] se ha tomado $c = k_B = 1$. El primer término es la expresión original de la entropía de Bekenstein-Hawking, que es un valor semiclásico, mientras que el segundo es una corrección genuina procedente de la gravedad cuántica de bucles. Esta expresión resulta al tener en cuenta las fluctuaciones del «vacío», que aquí quiere decir el estado de mínima energía, no solo de la geometría del horizonte de sucesos (caso de las «sacudidas» del horizonte de sucesos), sino también de las partículas con masa en la vecindad de este (caso del entrelazamiento).



Entropía de un agujero negro. A la izquierda, porción del horizonte de sucesos que siente un observador y triangulación del mismo (atravesada por la red de espines). La entropía se obtiene del área de tal triangulación. Cuánticamente, las relaciones de Heisenberg hacen que las fluctuaciones del horizonte lo sacudan. A la derecha, entrelazamiento entre partículas y gravitones fuera y dentro del horizonte de sucesos. La entropía es la medida de la información «perdida» tras el horizonte.

En relatividad general, este número se hace infinito, porque existen infinitos estados con un área infinitesimal, pero en la gravedad cuántica de bucles es finito gracias al carácter discreto de la geometría cuántica, al discretizar el horizonte de sucesos mediante una triangulación. La triangulación tiene un número determinado de triángulos, cada uno con un área determinada. Todas estas áreas están acotadas por el área de Planck, es decir, el área mí-

nima. En general, tales áreas serán mayores, pero alguna que otra puede tener el valor mínimo. Debido precisamente a esa cota inferior, el número de triángulos que cubre el horizonte de sucesos es finito.

La segunda forma de obtener la expresión de la entropía de un agujero negro se basa en dos ideas. La primera es que un observador cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro solamente interacciona con una pequeña parte de aquel. Por tanto, basta considerar la triangulación de una pequeña región de la superficie del horizonte con un único triángulo, es decir, un único enlace de una red de espines atravesando el horizonte.

La segunda idea consiste en identificar la entropía de Bekenstein-Hawking como *entropía de entrelazamiento*. El entrelazamiento es una propiedad genuinamente cuántica. Significa que no es posible describir un sistema como la suma de sus partes. Nos indica que las partes del sistema exhiben correlaciones entre sí que no se pueden ignorar a la hora de tratar el sistema total. La idea en la gravedad cuántica de bucles es describir la entropía de un agujero negro mediante el entrelazamiento entre partículas con masa y gravitones que se hallan en el interior y el exterior del horizonte de sucesos.

Estas dos maneras de interpretar la entropía de Bekenstein-Hawking en la gravedad cuántica de bucles, como el efecto de las fluctuaciones cuánticas del horizonte de sucesos o como la entropía de entrelazamiento entre partículas y gravitones en el interior y el exterior de dicho horizonte, son dos caras de la misma moneda, a saber, las fluctuaciones cuánticas de cualquier sistema, por ejemplo un campo, cerca del horizonte. Por un lado, las fluctuaciones de este campo generan fluctuaciones en la geometría del

espacio-tiempo, que, a su vez, inducen una especie de sacudida cuántica del horizonte. Por otro lado, podemos imaginarnos el horizonte como una superficie fija en algún sistema de referencia, como una foto, de modo que las fluctuaciones cuánticas de tal campo cruzan el horizonte de sucesos y hacen que se acoplen, se entrelacen, las partículas y gravitones en el interior y el exterior del horizonte de sucesos.

Hemos visto dos de las aplicaciones de la gravedad cuántica de bucles a procesos físicos concretos. Por un lado, elimina el Big Bang y lo sustituye por el Gran Rebote, quizá uno entre una concatenación infinita de estiramientos y contracciones de un universo sin principio ni fin. Por otro, la teoría predice la entropía de Bekenstein-Hawking de los agujeros negros. Junto con el límite clásico que vimos en el capítulo previo, en el cual la teoría se reduce a la relatividad general, la obtención de la fórmula correcta para la entropía en el caso semiclásico es un síntoma de que vamos por el buen camino.

Observando las escalas más pequeñas

En los dos capítulos anteriores hemos explicado una de las distintas propuestas para una teoría de la gravedad cuántica. La gravedad cuántica de bucles aspira a reconciliar los dos pilares de la física moderna: la relatividad general, con el consecuente carácter dinámico del espacio-tiempo, y la mecánica cuántica, con su naturaleza discreta y probabilística.

Hemos visto que la principal implicación física de esta teoría es el carácter discreto del espacio-tiempo, los átomos de espacio-tiempo. Además, ofrece prometedoras soluciones a varias cuestiones bastante antiguas de la física, como la eliminación del Big Bang o la predicción de la entropía de los agujeros negros. Aunque hemos descrito, en el capítulo anterior, los recientes resultados de la cosmología cuántica de bucles y sus intentos por acercarse a los datos observacionales, la verificación del Gran Rebote o la evaporación de agujeros negros (como consecuencia de la radiación de Hawking) están aún fuera del alcance de la tecnología actual y la prevista para los próximos años.

En este capítulo abordaremos el desafío de hallar evidencia experimental u observacional de la naturaleza cuántica de la gravitación desde una perspectiva más amplia. Para ello, analizaremos diversas propuestas muy recientes, basadas en la tecnología de vanguardia, cuyo objetivo es arrojar algo de luz sobre el problema. Las predicciones teóricas que los experimentos y observaciones tratan de corroborar corresponden a diversos modelos de la gravedad cuántica, y no todos comparten las bases de la gravedad cuántica de bucles. El objetivo es ofrecer al lector una imagen general de la investigación actual en gravedad cuántica.

La observación directa de los efectos cuánticos de la gravitación, es decir, de las fluctuaciones cuánticas de la curvatura del

espacio-tiempo, es toda una hazaña tecnológica, que excede con mucho las posibilidades de los aceleradores de partículas, debido al minúsculo valor de la escala de Planck. Sin embargo, los impresionantes avances en la nanotecnología, por un lado, y en el diseño de telescopios, por otro, nos hacen albergar la esperanza de que la observación de la naturaleza cuántica de la gravitación pueda ser una realidad en un futuro no tan lejano como se pensaba hasta hace apenas una década.

Dado que aún no tenemos ninguna teoría que se pueda considerar como «la teoría» de la gravedad cuántica, los intentos por observar fenómenos asociados a ella se centran en hallar maneras de comprobar ciertas características que parecen generales, ya que las predicen varias de las teorías propuestas. Por ejemplo, las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo, o la presencia de una longitud mínima, que impondría un límite en la resolución de cualquier dispositivo. Se pueden cuantificar tales efectos en modelos matemáticos, de manera que nos sirvan de guía a la hora de diseñar aquellos experimentos que tengan más opciones de detectarlos.

PROFANANDO A EINSTEIN: OLVIDANDO LA RELATIVIDAD GENERAL

Dado que, en su búsqueda de la gravedad cuántica, los físicos teóricos han de ser capaces de elucidar qué hipótesis de las teorías anteriores, la relatividad general y la mecánica cuántica, podrían no ser correctas a la escala de Planck, hoy día existen diversos modelos que violan algunas de ellas. La idea es ver si eso conlleva la predicción de fenómenos que experimentos y observaciones en

curso o planeados para dentro de pocos años sean capaces de detectar.

De todas estas violaciones, la preferida por los teóricos es la simetría de Lorentz. Recordemos que esta simetría está en el corazón de la relatividad de Einstein. Físicamente, significa que las leyes de la naturaleza son las mismas para cualquier observador inercial. Desde el descubrimiento de la relatividad especial en 1905, la simetría de Lorentz ha superado todos los juicios de los experimentos. Este es uno de esos casos en los que un resultado negativo sí es importante, pues sabemos que la simetría de Lorentz se conserva, al menos, con muy buena aproximación.

Existen dos formas de desviarse de la forma concreta con que esta simetría aparece en la relatividad: una es romperla de manera explícita, esto es, eligiendo un sistema de referencia preferido; la otra consiste en «deformar» la simetría, de manera que las ecuaciones de las transformaciones de Lorentz tengan una expresión diferente a energías muy altas, pero sin introducir ningún sistema de referencia especial. De ahí la palabra «deformar»: extender la simetría de Lorentz hasta las energías de la escala de Planck.

Estirando a Lorentz

La idea de deformar la simetría de Lorentz respeta el espíritu del razonamiento de Einstein: ante la aparente contradicción entre el principio de relatividad de Galileo y el electromagnetismo de Maxwell, el genio alemán, al contrario que sus coetáneos, no introdujo sistema inercial preferido alguno, sino que modificó las transformaciones de Galileo para que fuesen compatibles con la teoría de Maxwell. Aquí pasa algo parecido: en vez de introducir un sistema inercial privilegiado, se cambian las transformaciones de Lorentz para tratar de conciliar la relatividad con la mecánica

cuántica. Sin embargo, en este caso, el tema es muy sutil, pues no está nada claro que tal deformación de la simetría de Lorentz realmente ayude en el problema de la gravedad cuántica.

La propiedad más significativa de algunos modelos con la simetría de Lorentz deformada es la dependencia de la velocidad de la luz con la energía. Uno de los principios sobre los que se basa la relatividad es el hecho de que la velocidad de la luz (en el vacío) es constante. Pues bien, según estos modelos, fotones con diferentes energías viajan a distintas velocidades. En otras palabras, dos fotones emitidos por la misma fuente, pero con energías distintas, no llegarán a la vez a los detectores. Esta diferencia en el tiempo de llegada al detector es lo que diversos grupos experimentales tratan de observar.

En el mejor escenario posible, la velocidad del fotón depende del cociente entre su energía y la energía de Planck. Dado que esta última es enorme, incluso para fotones con energías en el rango de los gigaelectronvoltios tal cociente es ridículo, del orden de 10^{-19} (recordemos que un giga son mil millones y que un electronvoltio es la energía que adquiere un electrón cuando se mueve a través de una diferencia de potencial de un voltio). No obstante, la situación no es tan mala. Si los fotones recorren vastas distancias desde la fuente hasta nuestros detectores, la diferencia en el tiempo de llegada se amplifica. Por tanto, muchos de los esfuerzos actuales se centran en detectar fotones muy energéticos procedentes de muy lejos. Una fuente ideal en este caso son las llamadas explosiones de rayos gamma (los rayos gamma son los fotones más energéticos de todo el espectro electromagnético). Resulta que tomando distancias del orden de algunos gigapársecs (recordemos, 1 pársec=3,26 años-luz) y energías de varios gigaelectron-

voltios, sería posible detectar los distintos tiempos de llegada de los fotones al detector. ¡Estas distancias son inmensas! Estos modelos con la velocidad del fotón dependiente de su energía son los protagonistas invitados de la siguiente historia.

Un fenómeno astrofísico causó gran revuelo acerca de la situación experimental de la simetría de Lorentz. En mayo de 2009, el telescopio Fermi para rayos gamma de la NASA detectó algo que habría de suscitar un gran debate dentro de la comunidad de gravedad cuántica. Lo que Fermi registró fue una minúscula fracción de un fenómeno cósmico descomunal: una explosión de rayos gamma.

Las explosiones de rayos gamma se producen cuando una estrella de masa enorme y en rotación colapsa sobre sí misma, expulsando en menos de un minuto tanta energía como la que nuestro sol radiará durante sus diez mil millones de años de vida. Estas ondas de choque de rayos gamma y otros fotones muy energéticos son los fenómenos más luminosos del universo conocido. Se sospecha que las explosiones de este tipo ocurridas en la Vía Láctea puedan estar detrás de cambios climáticos en nuestro planeta en el pasado y, en consecuencia, de extinciones en masa. Afortunadamente, estas violentas explosiones son tan raras que normalmente suceden a una distancia prudencial para nosotros. Y cuando alcanzan nuestro planeta, es en forma de un puñado de fotones. El telescopio Fermi se puso en órbita precisamente para detectar tales fotones, testigos aislados de un fenómeno sobrecogedor. Y así ocurrió. Hace siete mil millones de años, a siete mil millones de años-luz de distancia, una explosión de rayos gamma envió un regimiento de fotones a conquistar el espacio. Un pequeño pelotón de ellos se dirigió a la Tierra.

Un equipo de astrofísicos, liderados por Robert J. Nemiroff, de la Universidad Tecnológica de Michigan, al analizar los datos registrados por Fermi, se percató de que tres rayos gamma, de energías similares pero no iguales, habían llegado al detector de manera consecutiva, pero con un milisegundo de diferencia entre ellos. Es decir, estos tres jinetes hundieron sus lanzas en el detector de Fermi casi a la vez.

Aquí vuelven a escena los modelos de gravedad cuántica que predicen que la velocidad de la luz (fotón) depende de su energía. Siguiendo con la historia, si estos tres fotones con energías distintas habían llegado casi simultáneamente al detector, parece poco probable que tuviesen velocidades diferentes. Claro, esto solo se cumple si recorrieron la misma distancia antes de ser detectados. En otras palabras, había que averiguar si los tres fotones procedían de la misma fuente. Mediante simulaciones por ordenador de este tipo de explosiones, basándose en modelos astrofísicos de la dinámica estelar, el equipo concluyó que era muy poco probable que los tres fotones se hubiesen emitido en explosiones distintas, o en la misma explosión pero en diferentes instantes. Por tanto, los investigadores concluyeron que lo más probable era que los tres fotones hubiesen recorrido juntos la vasta distancia hasta nosotros. Nada habría desviado a ninguno de su camino.

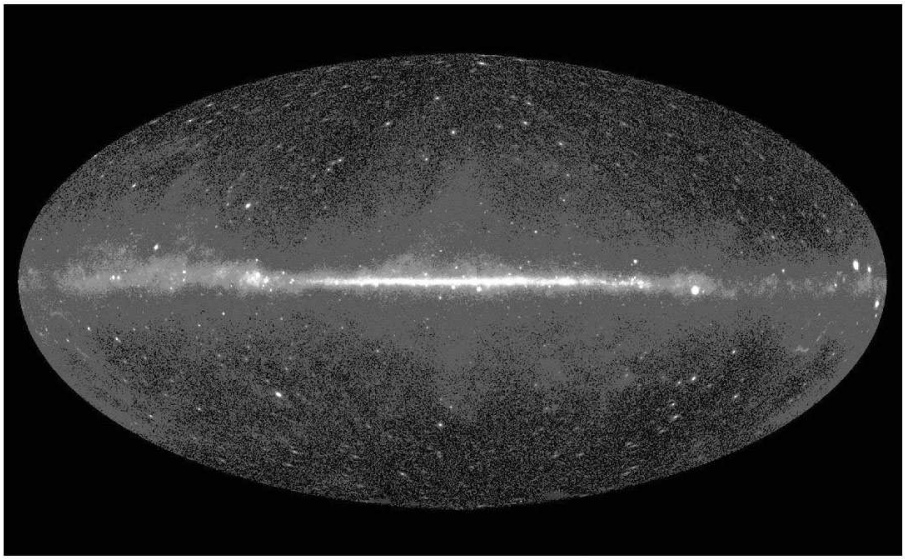


Imagen en rayos gamma del cielo completo obtenida a partir de tres años de observaciones del telescopio Fermi. La zona central más brillante corresponde al plano de la Vía Láctea.

Continuando con su razonamiento, el equipo recordaba que existen numerosos objetos en el espacio que podrían haber desviado los fotones (como estrellas o polvo interestelar). Sin embargo, si un fotón se desvía, no se conoce nada capaz de devolverlo a su estado inicial antes de ser desviado. Por tanto, si esos tres fotones no fueron desviados, entonces campaban a sus anchas solos por el universo. Pero si el universo está hecho de espuma cuántica, como algunos modelos predicen, los fotones no habrían corrido esa maratón en solitario. Así que, termina el razonamiento, esas espumas cuánticas a la escala de Planck no existen.

A primera vista, parece que se ha asestado un golpe fatal a los modelos con espuma cuántica. Sin embargo, no todo el mundo comparte el veredicto. El físico italiano Giovanni Amelino-Camelia, uno de los pioneros del campo de la fenomenología de la gravedad cuántica a finales de 1990, por una parte, se muestra con-

tento por la confirmación de la posibilidad de estudiar la estructura del espacio-tiempo a la escala de Planck. Ahora bien, por otra parte, considera que la conclusión del equipo de Nemiroff (la no existencia de espuma cuántica) es excesiva. Según el italiano, para demostrar que la espuma cuántica no existe los investigadores tendrían que haber descartado la posibilidad de que dicha espuma desviase los fotones de una manera más sofisticada según sus longitudes de onda. También cabe la posibilidad de que la espuma crease un fenómeno conocido como *birrefringencia*, que explicaremos más adelante. El equipo de Nemiroff no ha tenido en cuenta estos ni otros efectos. Es más, para corroborar que el registro del trío de jinetes no ocurrió por casualidad —error instrumental—, los resultados requieren confirmación independiente.

Rompiendo la simetría de Lorentz a la fuerza

Además de los modelos que solo deforman la simetría de Lorentz, hay otros que de manera explícita violan el contenido físico de esta. Para ello, introducen un sistema de referencia inercial privilegiado, esto es, uno en el que las leyes de la física son distintas a las correspondientes al resto de los sistemas. Lo más fácil es tomar una dirección del espacio como «especial».

La consecuencia de romper la simetría de Lorentz es que ahora muchos procesos (prohibidos por tal simetría) son posibles, como por ejemplo el tiempo de vuelo del fotón (el hecho de que fotones con energías diferentes viajan a velocidades distintas) y la birrefringencia en el vacío. Respecto al tiempo de vuelo, solo añadiremos que este fenómeno lo comparten todos los modelos que rompen la simetría de Lorentz y algunos que solo la deforman. Varias colaboraciones tratan de observar si en realidad existe retraso en la llegada de ciertos fotones a los detectores. Por el momento, no

se ha observado ninguno (caso de Fermi), lo que permite poner límites a los posibles valores de los parámetros de estos modelos.

Para entender el concepto de birrefringencia, primero hemos de analizar la *polarización* de una onda. Como se representa en la figura 1, las ondas electromagnéticas son oscilaciones periódicas de los campos eléctricos y magnéticos generados por partículas cargadas (como el electrón). La polarización indica la orientación geométrica de la oscilación respecto de la dirección de propagación de la onda.

Existen tres tipos de polarizaciones de las ondas electromagnéticas, como se muestra en la figura 2. En realidad dos de ellas son casos particulares de la otra. Comencemos por la más sencilla, denominada *polarización lineal o plana*. Imaginemos una onda electromagnética, esto es, un haz de luz, que se propaga de izquierda a derecha. Supongamos que el campo eléctrico oscila únicamente en el plano vertical, de arriba abajo, mientras que el campo magnético solo lo hace en el plano horizontal, de dentro a fuera de la página. Esta restricción sobre los campos eléctrico y magnético a oscilar en un único plano es lo que define una onda con polarización lineal o plana. Por puro convenio, la dirección de la polarización se toma como la misma de la oscilación del campo eléctrico.

La segunda forma de polarización es la conocida como *polarización circular*. En este caso, mientras la onda se propaga de izquierda a derecha, por ejemplo, el campo eléctrico oscila de manera rotatoria, pero manteniendo fija su amplitud, esto es, la altura del campo eléctrico respecto del eje de propagación de la onda, magnitud que mide la intensidad de dicho campo, de manera que, en un plano fijo, describe un círculo, mientras que exhibe un círculo abierto (hélice) debido al movimiento de la onda.

La tercera forma de polarización de una onda electromagnética es la llamada *polarización elíptica.* En este caso, el campo eléctrico oscila de manera rotatoria pero con una amplitud variable. En un plano fijo la figura descrita es una elipse, mientras que, como consecuencia de la propagación de la onda, surge la figura de una elipse abierta, denominada hélice elíptica. La polarización elíptica es la más general de las tres, e incluye a la circular y la lineal como casos especiales.

Hemos visto que la polarización indica que el campo eléctrico de la onda oscila en una única dirección, ya sea una línea, un círculo o una elipse. Sin embargo, cabe la posibilidad de que tales oscilaciones del campo eléctrico se produzcan en todas direcciones, sin estar confinadas en modo alguno. En este caso, decimos que la luz es no polarizada.

Ya estamos en situación de explicar el concepto de birrefringencia. Decimos que un material es birrefringente si su índice de refracción depende de la polarización y dirección de propagación de la luz al atravesar dicho material. El índice de refracción de un material es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en tal medio, e indica cuánto se curva, o refracta, la luz al entrar en dicho material. Este fenómeno se muestra en la figura 3 (véase también la fotografía superior de la pág. 131), donde se representa la propagación de un haz a lo largo de un medio *ópticamente isótropo*, esto es, aquel cuyas propiedades ópticas no dependen de la dirección de propagación del haz. En este caso, se cumple la ley de Snell de la refracción.

FIG. 1

La onda electromagnética. Los campos eléctrico y magnético oscilan perpendicularmente entre sí, el campo magnético en un plano horizontal y el campo eléctrico en uno vertical.

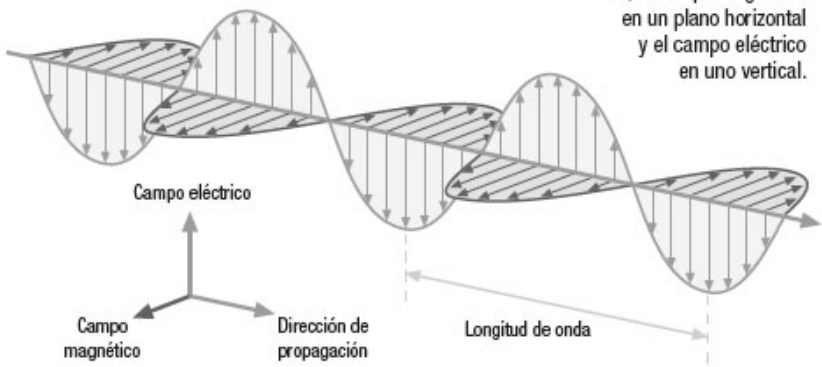
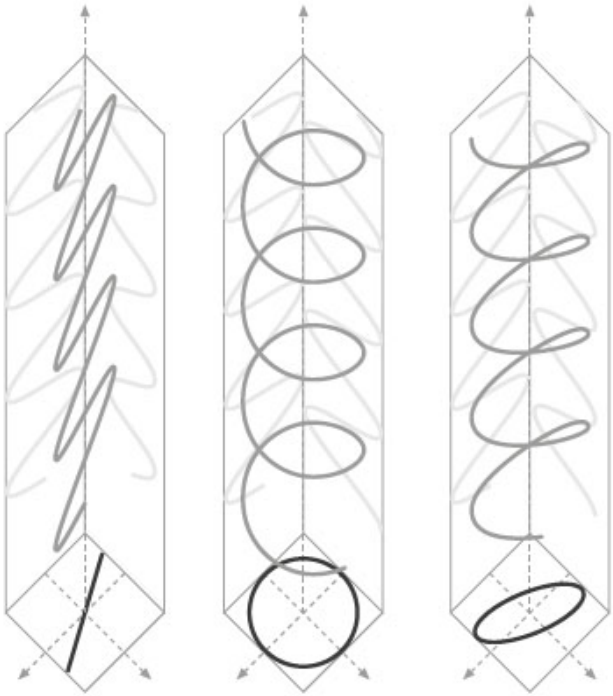


FIG. 2

Polarizaciones de la luz. Vemos que las oscilaciones de la luz, en un plano fijo, describen una línea, un círculo o una elipse, según que la polarización sea lineal, circular o elíptica, respectivamente. La polarización elíptica es la más general. La línea y el círculo son casos particulares de la elipse.



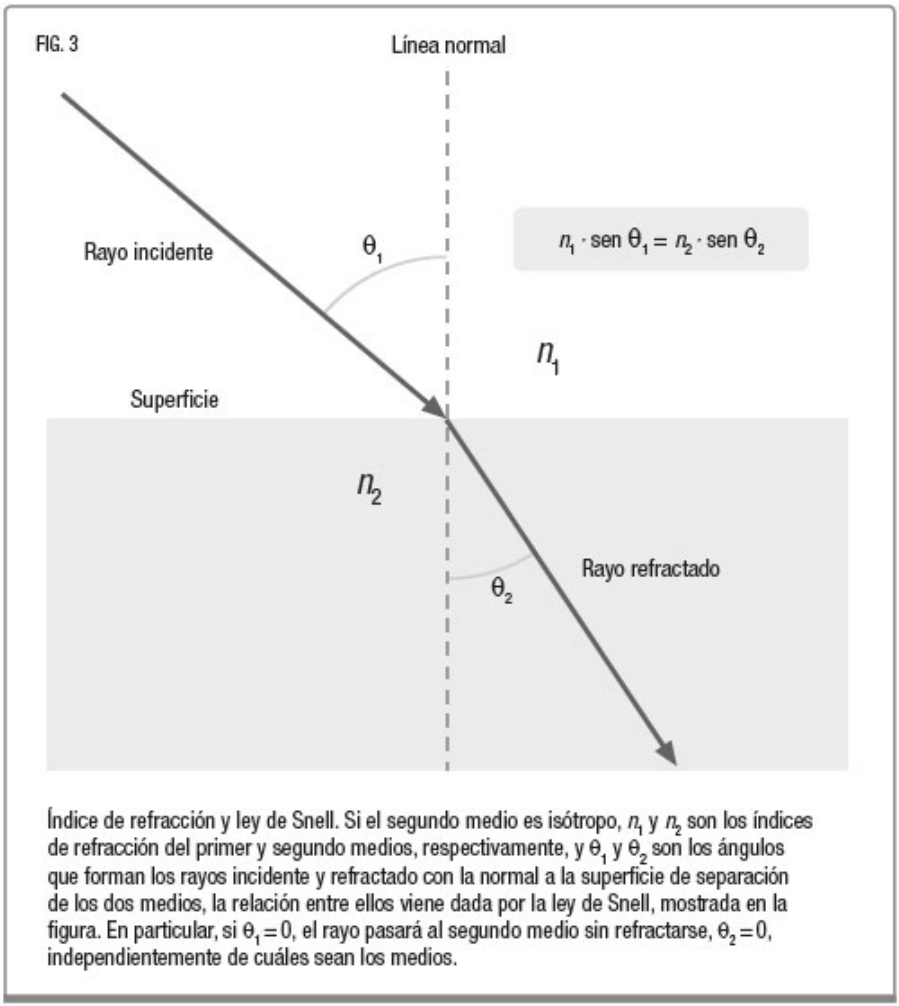
Debido a que sus características dependen de la dirección de

propagación del haz de luz, se dice que los materiales birrefringentes son *ópticamente anisótropos*. El motivo es que las moléculas del material no responden a la luz incidente de igual forma en todas direcciones. No obstante, todos los materiales birrefringentes tienen, al menos, un eje óptico a lo largo del cual el haz de luz incidente se propaga sin consecuencias para ninguna componente del campo eléctrico. Dicho eje óptico sirve de referencia. Por su parte, cualquier haz que incida en una dirección distinta al eje óptico experimenta dos índices de refracción diferentes, además de ser descompuesto en componentes que viajan con velocidades distintas y con polarizaciones perpendiculares. Por ejemplo, si el haz incide de manera perpendicular al eje óptico, la componente polarizada en la dirección perpendicular a tal eje óptico «siente» el llamado *índice de refracción ordinario*. Esta componente del haz incidente obedece la ley de Snell y se denomina rayo ordinario (figura 4). Por el contrario, la componente polarizada según la dirección paralela al eje óptico siente el *índice de refracción extraordinario*. Esta componente no sigue la ley de Snell, y recibe el nombre de rayo extraordinario (véase la figura 4). La diferencia entre los índices de refracción extraordinario y ordinario se conoce como la birrefringencia del material.

Uno de los materiales birrefringentes más conocidos es el espato de Islandia, una variedad transparente de calcita. La fotografía inferior de la pág. 131 muestra un caso real de la doble refracción propia de materiales anisótropos.

El índice de refracción de un medio varía con la longitud de onda de la luz incidente. La consecuencia es la dispersión de la luz blanca, es decir, su descomposición en los diferentes colores del espectro, ya que cada color no es más que luz con una longitud de

onda determinada. Esto es lo que sucede al hacer incidir luz sobre, por ejemplo, un prisma o las moléculas de agua en el aire tras la lluvia, dando lugar al arcoíris.

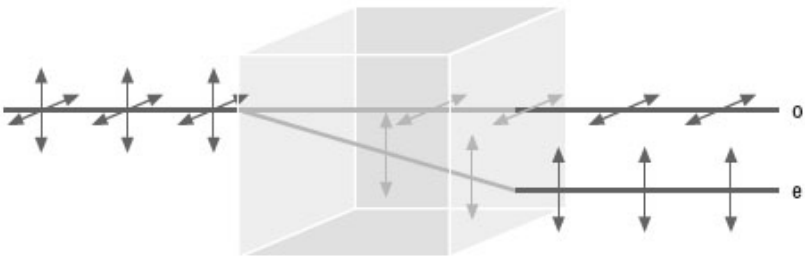


Índice de refracción y ley de Snell. Si el segundo medio es isótropo, n_1 y n_2 son los índices de refracción del primer y segundo medios, respectivamente, y θ_1 y θ_2 son los ángulos que forman los rayos incidente y refractado con la normal a la superficie de separación de los dos medios, la relación entre ellos viene dada por la ley de Snell, mostrada en la figura. En particular, si $\theta_1 = 0$, el rayo pasará al segundo medio sin refractarse, $\theta_2 = 0$, independientemente de cuáles sean los medios.

Tras este breve repaso, retomemos las posibles evidencias de la gravedad cuántica. Ciertos modelos predicen la birrefringencia del vacío. La palabra «vacío» es bastante confusa aquí. Lo que se quiere decir es que la birrefringencia la causan los átomos de espacio-tiempo al ser atravesados por los fotones. Aquí, los átomos

de espacio-tiempo son el análogo de las moléculas en un material anisótropo. Supongamos un haz de luz linealmente polarizada. Recordemos que ello significa que el campo eléctrico oscila en una única dirección, digamos de arriba abajo. Pues bien, en estos modelos se predice la rotación de esa dirección de polarización de la luz en su viaje por el cosmos. Esto se debe a que, de ese haz de luz, los fotones de diferentes energías sienten distintos índices de refracción al atravesar los átomos de espacio-tiempo, en analogía con los rayos ordinario y extraordinario al atravesar la calcita. Como resultado de tales rotaciones, después de atravesar los átomos de espacio-tiempo, el haz de luz tendrá polarizaciones en múltiples direcciones. Y esto, por definición, es luz no polarizada. Por tanto, según estos modelos, no deberíamos detectar luz linealmente polarizada. El hecho de que sí lo hagamos permite acotar los parámetros de tales modelos.

FIG. 4

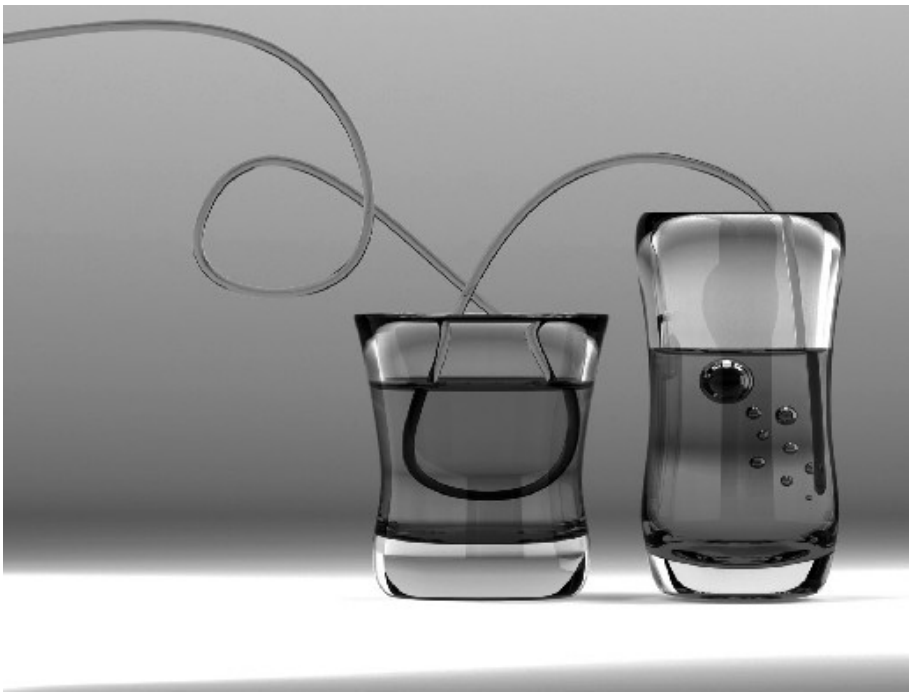


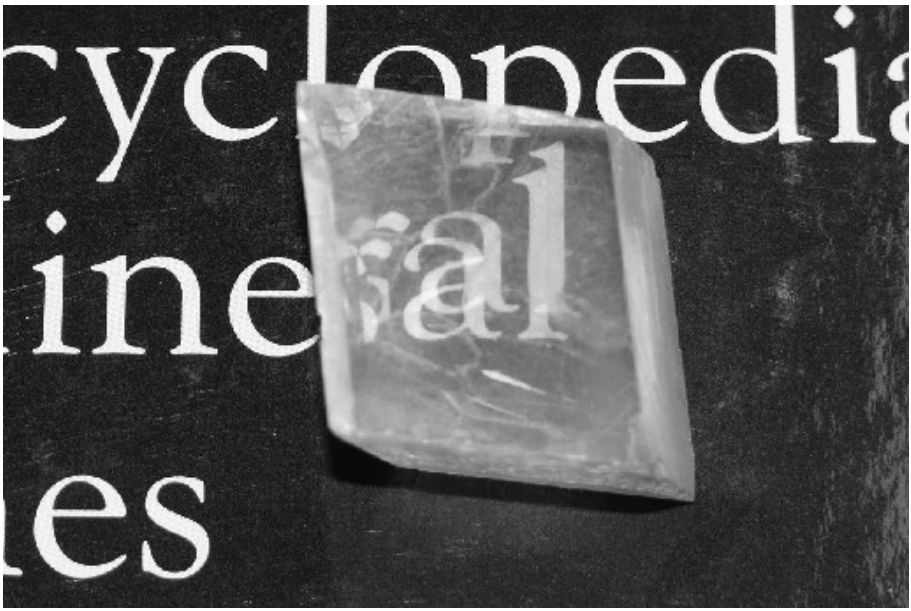
Propagación de un haz de luz en un medio anisótropo. La figura muestra un haz incidente polarizado en direcciones perpendiculares, horizontal y vertical. El rayo ordinario, o, se propaga a través del material sin refractarse. Por su parte, el rayo extraordinario, e, sí se refracta al atravesar el material.

Otro de los efectos sorprendentes que predicen ciertos modelos de gravedad cuántica es el «arcoíris» producido por el espacio-tiempo. Todos hemos hecho el experimento de tomar un prisma y hacer incidir luz blanca sobre él. Al otro lado del prisma se nos revela el colorido espectro del arcoíris. Dado que la luz blanca está compuesta por fotones de distintas energías, este fenómeno no es más que la diferente dispersión de estos fotones por el prisma. En cierto sentido, es como si el arcoíris se formase porque fotones con diferentes energías sienten propiedades distintas del mismo prisma. En los últimos años los físicos teóricos han sospechado que, de modo análogo al caso del prisma, partículas con distintas energías sienten el espacio-tiempo cuántico como si tuviera diferentes estructuras. En un trabajo reciente, el grupo del profesor Jerzy Lewandowski de la Universidad de Varsovia afirma haber formulado un mecanismo general para la aparición de este arcoíris espacio-temporal.

El modelo estudiado por este grupo es independiente de las cualidades concretas de un tipo determinado de teoría de la gravedad cuántica. La idea es que sus resultados puedan ser válidos en las condiciones más generales posibles. En su trabajo, el grupo analiza un modelo cosmológico con solo dos componentes: gravedad y un tipo de materia, un *campo escalar*. Recordemos que un campo no es más que una magnitud que se extiende por todo el espacio-tiempo. Así, se puede representar como una función que tiene un valor por cada «punto» del espacio-tiempo. Pues bien, un campo escalar es el más simple de todos: el valor del campo viene descrito por una función que no depende de la dirección desde la que la miremos en un punto concreto del espacio-tiempo, pero el valor de tal función varía de un punto a otro. La tempera-

tura es un ejemplo de campo escalar. Imaginemos que calentamos una superficie. A continuación, hacemos una foto antes de que toda la superficie tenga la misma temperatura (llegue al equilibrio térmico). En este caso, la temperatura de la superficie se puede describir mediante una función cuyo valor varía de un punto a otro. Ahora bien, dicho valor, si fijamos un punto de la superficie, es el mismo si acercamos el dedo por la derecha, arriba, izquierda o abajo. En el modelo del grupo de Varsovia el campo escalar no describe la temperatura, sino la masa de cierto objeto.





Arriba, un ejemplo de refracción de la luz en líquidos. Abajo, un cristal de calcita mostrando el fenómeno de la doble refracción o birrefringencia.

Cuando el grupo estudió el comportamiento de este campo escalar, que representaba la materia en ese modelo cosmológico, descubrió algo sorprendente sobre las *excitaciones* de dicho campo. Las excitaciones de un campo se pueden visualizar como «protuberancias» en la superficie del espacio-tiempo. En teoría de campos, estas excitaciones de un campo se interpretan físicamente como partículas; así, el fotón es la excitación del campo electromagnético. En este contexto, el grupo de Varsovia calculó las interacciones de estas partículas y descubrió que la forma de la interacción dependía de la energía de la partícula, en clara analogía con el caso del prisma.

La formación de un arcoíris tradicional se describe mediante el índice de refracción, cuyo valor depende de la energía de la luz. El equipo de Varsovia ha propuesto una relación similar para el caso del arcoíris espacio-temporal: han definido una función que mide

cómo experimentan la estructura del espacio-tiempo partículas de distintas energías. Así, esta función refleja el grado cuántico del espacio-tiempo: en situaciones próximas al caso clásico, su valor se anula, mientras que se acerca a uno en las condiciones puramente cuánticas. Hoy día, nuestro universo se halla en un estado clásico, por lo que el valor de esta función debería ser casi nulo. De hecho, estimaciones teóricas de otros grupos sugieren que tal valor debe ser menor que 0,01. En principio, este valor tan pequeño de esta función implica que el arcoíris espacio-temporal es demasiado débil como para detectarse.

Pero puede que haya cierta esperanza. Resulta que esta función depende del tiempo, de modo que en el universo muy primitivo, donde se supone que la naturaleza cuántica de la gravitación sería importante, su valor habría sido próximo a uno. En estas condiciones, el arcoíris espacio-temporal que se genera se «estira» de manera significativa, gracias al estiramiento del propio universo (recordemos el símil de la masa de cocina y las pasas incrustadas en ella; en este caso, cada pasa es el arcoíris espacio-temporal en cada punto del espacio-tiempo). Como resultado, si este arcoíris espacio-temporal realmente se generó en las etapas más primitivas del universo, es posible que dejase alguna huella en el fondo cósmico de microondas. Colaboraciones como Planck o POLARBEAR podrían ser testigos de este arcoíris cósmico.

A LA CAZA DE ELUSIVAS SEÑALES

Otra de las fuentes de posibles fenómenos asociados a la gravedad cuántica es el llamado *límite débil* de la teoría, es decir, la fase donde los efectos cuánticos gravitatorios tendrían poca intensi-

dad, pero, aun así, la suficiente como para afectar a la materia. Los cosmólogos saben describir este régimen, que se da durante la fase de inflación.

Buceando en el ruido cósmico

En el universo primitivo, las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo, conocidas como *ondas gravitatorias primordiales*, habrían dejado su huella en la materia en forma de fluctuaciones de la temperatura. Estas fluctuaciones de la temperatura aún se observan en la actualidad en el fondo cósmico de microondas. Hasta la fecha, no se ha podido detectar la huella de tales ondas gravitatorias primordiales en el fondo cósmico de microondas (el detector LIGO no tiene la sensibilidad necesaria). Afortunadamente, se han lanzado varias colaboraciones internacionales para intentar detectar tales señales, como BICEP, POLARBEAR, Planck, SPTPOL y SPIDER. Con un poco de suerte, en los próximos años tendremos información sobre las primeras etapas del universo.

Conviene aclarar la diferencia entre estas ondas gravitatorias primordiales y las ondas gravitatorias detectadas por LIGO. LIGO detectó ondas gravitatorias producidas por la colisión de dos agujeros negros, fenómeno que, por muy cataclísmico que pueda parecer, es netamente clásico, no cuántico: la relatividad general predice tales procesos. Por el contrario, las (hipotéticas) ondas gravitatorias primordiales se habrían producido en una época del universo en la que los efectos cuánticos de la gravitación eran importantes. Por tanto, su detección significaría la primera evidencia observacional del carácter cuántico de la gravedad.

Rozando la ciencia ficción

Otra forma de estudiar el límite débil de la gravedad cuántica

consiste en intentar colocar objetos macroscópicos en una superposición de estados cuánticos. Aquí «macroscópico» quiere decir con una masa mucho mayor que las correspondientes a las partículas subatómicas. Para hacernos una idea, la masa del protón es de aproximadamente $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g, un número realmente pequeño. Pues bien, los objetos macroscópicos de los que hablaremos tienen una masa del orden del nanogramo (10^{-9} g).

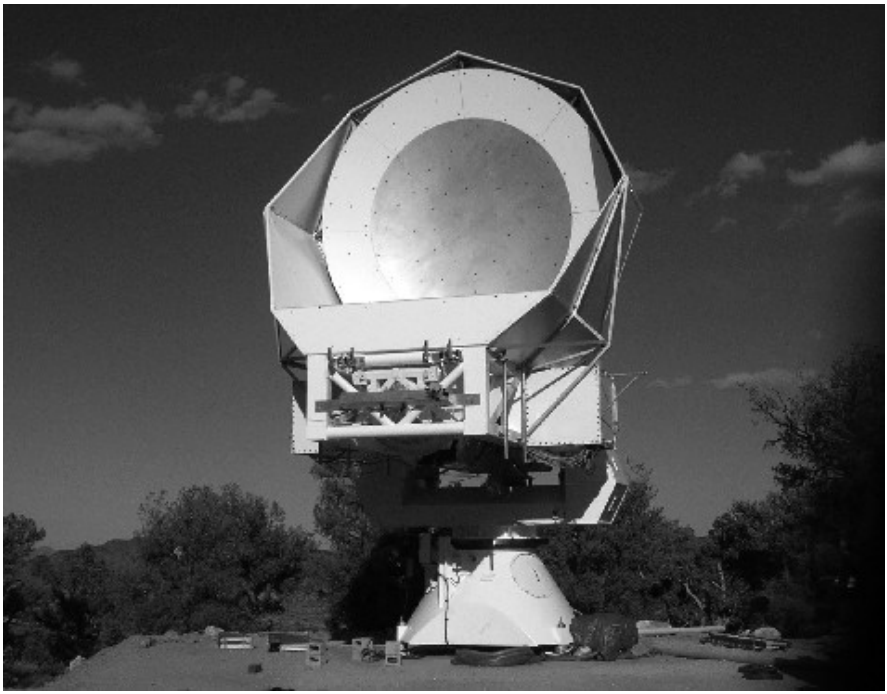
La idea es que, dado que tales objetos macroscópicos producen un campo gravitatorio mucho mayor que las partículas elementales usadas en los aceleradores, ofrecen la posibilidad de analizar el comportamiento cuántico de la gravedad: una vez que seamos capaces de medir el campo gravitatorio de un objeto que se halla en una superposición de dos lugares diferentes, podremos saber si dicho campo gravitatorio también está en una superposición.

LA POLARIZACIÓN DEL FONDO CÓSMICO

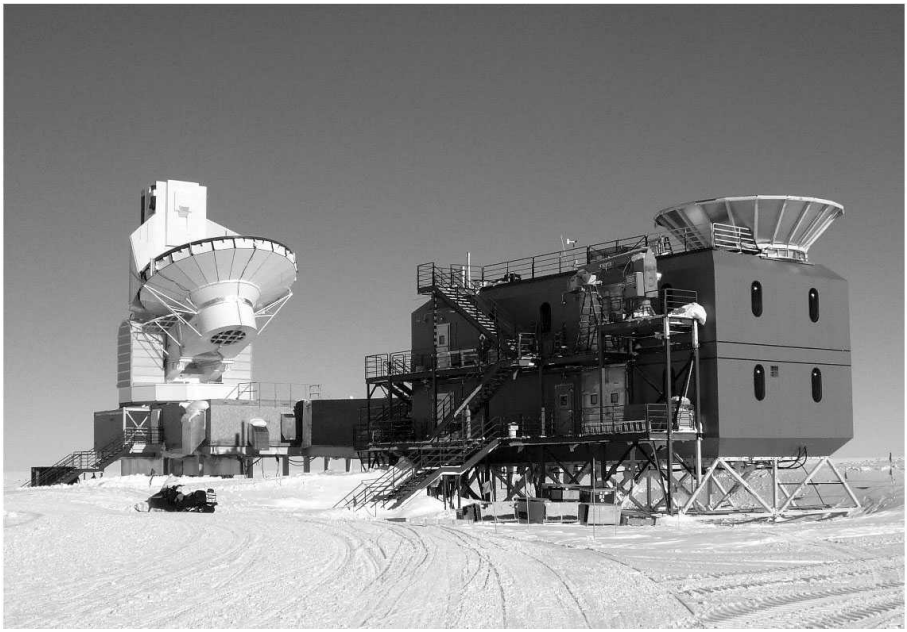
POLARBEAR es un telescopio que estudia la polarización del fondo cósmico de microondas. Está situado en el desierto de Atacama (Chile), en las laderas de Cerro Toco, a casi 5200 m de altitud. En abril de 2012 inició su primera temporada de observaciones.

Los modos B

El fondo cósmico de microondas presenta dos tipos de polarizaciones: los llamados *modos E* y *B*. POLARBEAR estudia el modo B. Este modo se puede generar mediante dos mecanismos: o bien lentes gravitatorias (la luz procedente de objetos distantes y brillantes se curva a causa de un objeto masivo) del modo E, o bien a partir de ondas gravitatorias procedentes de la inflación cósmica. Detectar los modos B es muy complicado, especialmente porque no se conoce el «ruido» cósmico; además, la señal de una lente gravitatoria tiende a mezclar las señales de los dos modos. Gran parte de las esperanzas de observar evidencia de la naturaleza cuántica de la gravitación están depositadas en este tipo de telescopios, capaces de detectar las señales más ínfimas escondidas en el fondo cósmico de microondas.



Gracias a su estratégica ubicación, POLARBEAR es capaz de detectar la polarización del fondo cósmico con una precisión sin precedentes.



El experimento BICEP lleva operando en la Antártida desde el año 2005, y varias generaciones de te-

lescopios han formado parte de él. Resultados obtenidos en 2014 por el BICEP2, en la imagen, llevaron a anunciar la detección de ondas gravitatorias.Tras combinar estos resultados con los de otros experimentos, como Planck, el hallazgo fue desmentido.

Por tanto, el desafío es doble: por un lado, conseguir poner en una superposición objetos de masa cada vez mayor, y por otro, medir el campo gravitatorio de objetos de masa cada vez menor.

Para entender la situación, pongámonos en el caso del físico experimental. Trabaja duramente para medir el campo gravitatorio de un objeto con la masa suficiente, o estudia las propiedades cuánticas de un objeto lo suficientemente pequeño. Pero no es capaz de hacer las dos cosas a la vez. O eso se pensaba. La última década ha sido testigo de prometedores avances en ambos frentes: la superposición de objetos de masa cada vez mayor y la medida del campo gravitatorio de objetos de masa cada vez menor.

Por un lado, un reciente trabajo de un grupo de investigadores de Italia e Inglaterra ha abierto la puerta al estudio de la superposición cuántica de objetos con una masa «tan alta» como un nanogramo (recordemos la comparación con la masa del protón). Por su parte, en lo que se refiere a medir el campo gravitatorio de objetos de masa cada vez menor, una reciente propuesta del grupo del físico Markus Aspelmeyer en Viena permitirá medir la fuerza gravitatoria de masas tan pequeñas como unos pocos miligramos. La propuesta se basa en la tecnología más vanguardista, la nanotecnología, para diseñar los componentes mecánicos del aparato de medida, componentes del tamaño de una micra, esto es, la milésima parte de un milímetro. De esta forma, se puede hacer todo el aparato de medida casi tan pequeño como se quiera, simplemente apilando un átomo sobre otro. Lo importante es que los nanodispositivos se pueden acercar al objeto de prueba, sin perturbarlo, a distancias menores que los dispositivos de mayor tamaño.

Por tanto, esta tecnología permite medidas con una precisión sin precedentes.

Aún hay seis órdenes de magnitud entre un miligramo y un nanogramo, la mayor masa que se ha podido poner en una superposición cuántica. Reducir ese seis a cero significaría medir el campo gravitatorio de un objeto en una superposición, lo que, a su vez, podría ser la primera evidencia experimental de la gravedad cuántica. Lo sorprendente de esta propuesta es que se basa en el desarrollo de una tecnología que hasta hace solo unos años ningún físico que estuviese investigando la gravedad cuántica había mencionado. Sencillamente, habían subestimado el avance tecnológico que, gracias a los actuales nanodispositivos, abre una nueva ventana hacia la exploración de la física fundamental.

A pesar de la dificultad de hallar signos de la naturaleza cuántica de la gravitación, vemos que hay en marcha numerosos experimentos y observaciones para tratar de arrojar algo de luz. El campo de la gravedad cuántica ha dejado de ser propiedad exclusiva de los teóricos. Cada vez más físicos teóricos y experimentales hablan entre ellos para saber qué fenómenos hay que buscar… y cómo hacerlo. Esperemos que en un futuro cercano esta gigantesca red de colaboraciones haya dado sus frutos.

LAS IMPLICACIONES DE LA GRAVEDAD CUÁNTICA EN LA DEFINICIÓN DE CIENCIA

Como ha quedado patente, la gravedad cuántica es terriblemente abstracta por naturaleza, no solo porque se refiere a una situación física (hipotética) muy alejada de nuestra experiencia cotidiana (¡tampoco vemos por la calle núcleos atómicos o agujeros negros!), sino porque, como hemos visto, ocurre a unas escalas a

las que solo recientemente la tecnología ha podido ofrecer ciertas esperanzas de acceder. Como se ha descrito en los apartados previos, hemos de conformarnos con observar los rayos cósmicos y demás fenómenos que nos llegan desde el espacio remoto, mientras la nanotecnología se desarrolla lo suficiente para atacar el problema en el laboratorio.

La física teórica moderna se halla en una situación sin parangón en su historia. Desde los albores del pensamiento científico de los filósofos presocráticos, la física teórica siempre ha ido de la mano de los datos experimentales. Cada vez que surgía un nuevo experimento u observación, se proponían ideas, hipótesis, para explicarlo. A menudo, estas simplemente se centraban en ese hecho recién descubierto. Pero otras veces, la idea correcta significaba relacionar fenómenos que hasta ese momento parecían totalmente distintos (como relacionar la caída de los objetos en la Tierra con el movimiento planetario, pues, hasta la llegada de Newton, prevalecía la separación aristotélica entre la «física de la Tierra» y la «física de los cielos»). Por tanto, de manera inmediata, esa idea que había explicado un hecho concreto daba lugar a predicciones teóricas que, a su vez, mantenían a los físicos centrados en diseñar experimentos para verificar tales predicciones. Y cuando dichas predicciones aprobaban el escrutinio experimental, la idea se convertía en ley. Habíamos adquirido conocimiento. Así ha avanzado la física, y la ciencia en general, desde que apareció.

La situación de la física teórica moderna no sigue este patrón. No lo ha hecho desde la década de 1970, cuando se completó el modelo estándar de la física de partículas. Aunque los bosones $W^{\pm}$ y Z^{0} de la fuerza nuclear débil, así como las oscilaciones de los neutrinos y la expansión acelerada del universo y, finalmente,

el famoso bosón de Higgs se descubrieron después de la culminación de dicho modelo, lo cierto es que tales descubrimientos no supusieron conocimiento nuevo. En el caso de los bosones citados, porque ya eran predicciones del modelo estándar; las oscilaciones de los neutrinos se describen sin problema dotándolos de masa (un parámetro libre, como todas las masas de este modelo); por último, la actual expansión acelerada del universo es una consecuencia natural de las ecuaciones de la relatividad general incorporando la llamada constante cosmológica. La popular energía oscura es solo una de las posibles soluciones para describir tal expansión acelerada, no el hecho en sí que se pretende explicar.

Juntos, la relatividad general y el modelo estándar encapsulan todo el conocimiento de la física moderna. Hasta la fecha, todas las predicciones de estas teorías se han comprobado experimentalmente. Y no se ha observado ningún fenómeno nuevo, con la salvedad mencionada, desde el modelo estándar (la primera sugerencia sobre la existencia de la materia oscura, hecha por el astrónomo holandés Jacobus Kapteyn, data de 1922). Los físicos han aprendido muchas cosas de estas teorías durante las últimas décadas, pero en lo que se refiere a conocimiento empírico, saben básicamente lo mismo que sus colegas de 1970. La consecuencia de esta situación es que el progreso teórico se basa casi exclusivamente en criterios como elegancia o simplicidad matemáticas. Por tanto, el umbral entre lo meramente útil y lo verdaderamente real se torna harto difuso. ¿Cómo saber, pues, cuándo se ha obtenido progreso auténtico? Más importante, ¿qué es, realmente, eso que llamamos «ciencia»? Conviene concluir este libro explorando ambas cuestiones desde un punto de vista con cierto sabor filosófico.

Una idea polémica

El filósofo austrohúngaro y nacionalizado británico sir Karl Popper propuso una de las doctrinas más importantes y controvertidas de la filosofía de la ciencia del siglo XX: la *falsabilidad* de una teoría como medida del progreso científico. Según Popper, nunca puede demostrarse una teoría científica, por muchas veces que se compruebe experimentalmente, puesto que *a priori* no hay motivo alguno por el cual no pueda fracasar la siguiente vez. Sin embargo, una única observación es suficiente para falsar una teoría, es decir, demostrar su falsedad. El propio Popper ilustró su idea con los cisnes negros. La frase «todos los cisnes son blancos» es falsable, pues basta encontrar un único cisne no blanco para probar su falsedad. Y así sucedió con el descubrimiento del cisne negro australiano. Al contrario que las ideas de la época, la falsabilidad trataba de falsar, no de demostrar, una teoría científica.

A Popper le salieron enseguida serios detractores. Entre ellos destacan el físico estadounidense y reconvertido en filósofo e historiador de la ciencia Thomas Kuhn y el filósofo austriaco nacionalizado estadounidense Paul Feyerabend. En su influyente libro de 1962 *La estructura de las revoluciones científicas*, Kuhn argumentaba que los científicos trabajaban dentro de un paradigma, esto es, el conjunto de conceptos y pensamientos que se considera el mejor para el avance de un campo en un momento dado. Un paradigma influía de manera importante en la manera en la que se interpretaban los datos experimentales. En particular, la transición de un paradigma a otro durante un periodo de revolución implicaba que los conceptos y técnicas antes y después de la misma eran *inconmensurables*. El concepto de inconmensurabilidad hace referencia a que no existe una medida común para comparar los conceptos empleados en paradigmas distintos. Por ejemplo,

los conceptos de espacio y tiempo de la mecánica newtoniana son tan diferentes a los propios de la relatividad de Einstein que carece de sentido considerar que se refieran a las mismas magnitudes físicas.

Inicialmente, Kuhn empleó el concepto de inconmensurabilidad para desafiar la idea predominante según la cual el progreso científico es acumulativo, es decir, que la actividad científica es una constante aproximación a la verdad. El motivo es que las revoluciones implicaban un cambio en la *ontología* de las teorías científicas. La ontología se refiere a las cualidades intrínsecas de un objeto, sin preocuparse sobre si es posible llegar a conocer dichas cualidades. Por el contrario, la *epistemología* trata precisamente de lo que puede saberse de un objeto. Tradicionalmente, la ciencia lidia con el carácter epistemológico de las cosas, dejando a la filosofía todo lo relativo a su ontología. En una teoría científica, cuando se habla de ontología, se hace de manera más restrictiva. La ontología de una teoría científica son todos los conceptos físicos básicos sobre los cuales se construye la teoría. Por ejemplo, en el electromagnetismo, la ontología son las partículas cargadas (como el electrón o el protón) y la radiación electromagnética (luz). A partir de estos conceptos básicos se construyen los campos eléctrico y magnético, así como los patrones de interferencia típicos de las ondas.

Por su parte, Feyerabend criticó duramente la tesis de Popper de la falsabilidad en su importante obra *En contra del método*, de 1975. Para él, no es nada fácil falsar una teoría. A menudo, los científicos mantienen una teoría después de haber sido, aparentemente, falsada. Para ello, cambian la interpretación del experimento, o añaden ideas *ad hoc*, o, simplemente, culpan a las perso-

nas que realizaron el experimento. A veces, esta rebeldía no conduce a nada, porque la teoría está mal. Punto. Pero otras, no fiarse del primer resultado experimental es lo correcto, como decía el gran Paul Dirac. ¿Cómo saber qué hacer? Feyerabend sostenía que no se puede. No hay una regla general que diga cuándo abandonar o seguir con una teoría. Vemos que Feyerabend era más radical que Kuhn en lo que concierne a la ausencia de un único método. Para él, la buena ciencia es aquella que permite resolver los problemas del momento. Es decir, no es que haya dos tipos, como sostenía Kuhn, ¡sino tantos como sean necesarios para explicar los fenómenos observados!

Eso que llamamos ciencia

La ciencia es la actividad humana más crítica. Los científicos nunca deben estar de acuerdo a menos que les obligue la evidencia. Más aún, la ciencia progresa cuando los científicos se ven obligados a estar de acuerdo sobre algo inesperado. Lo que hace que la ciencia prosiga y se mantenga sana es la controversia. Por ello, en las situaciones especiales en las que los científicos sí alcanzan un consenso, es porque no tienen elección. La evidencia les obliga a ello, incluso si no les gusta. Este, y no otro, es el motivo que hace que el progreso científico sea real.

La descripción del problema de la gravedad cuántica dada en este libro ha enfatizado hasta la saciedad el aspecto revolucionario de la relatividad general y la mecánica cuántica: el hecho de que ambas teorías descubrieron aspectos profundos de la naturaleza, aspectos que se erigen como nuestra mejor guía para adentrarnos en el desconocido mundo de la gravedad cuántica. Si examinamos el proceso según el cual, históricamente, la física ha ampliado nuestro conocimiento, nos damos cuenta de que el progre-

so de la física sí posee un aspecto acumulativo, sutil, pero firme, en contraste con la inconmensurabilidad de Kuhn. Al pasar de una teoría a la siguiente que la sustituye, no se salva solo el contenido empírico de la teoría antigua, sino algo más. Para ilustrar qué es este «más», consideremos un ejemplo histórico.

A finales del siglo XIX, los físicos teóricos se pasaban las noches en vela tratando de reconciliar las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo con el principio de relatividad de Galileo. Había dos soluciones obvias. Una era considerar que la teoría de Maxwell tenía una validez limitada, que debía ser extendida por alguna teoría más fundamental (el *éter*). La otra opción era suponer que era la equivalencia de los sistemas inerciales la que no era válida en cualquier situación; en particular, los fenómenos electromagnéticos implicaban que los sistemas inerciales no eran equivalentes. Ambas ideas eran lógicas y se investigó cada una de ellas. Eran un claro ejemplo del paradigma según el cual una revolución científica modifica profundamente las lecciones que las teorías antiguas nos han enseñado sobre el universo. ¿Cuál de ellas eligió Einstein? Ninguna. Einstein admiraba la teoría de Maxwell. Para él, el escocés había abierto una nueva ventana en la física. Dado el impresionante éxito de la teoría de Maxwell a todos los niveles (empírico, con el descubrimiento de las ondas electromagnéticas; conceptual, con la explicación de qué era la luz; tecnológico, con la invención de la radio), la admiración de Einstein está más que justificada. Y el genio alemán también sentía un gran respeto por la idea de Galileo, pues, de joven, quedó maravillado al ver cómo el físico holandés Christiaan Huygens derivaba la teoría de las colisiones con poco más que la invariancia galileana. Einstein comprendió que la gran intuición de Galileo —que el

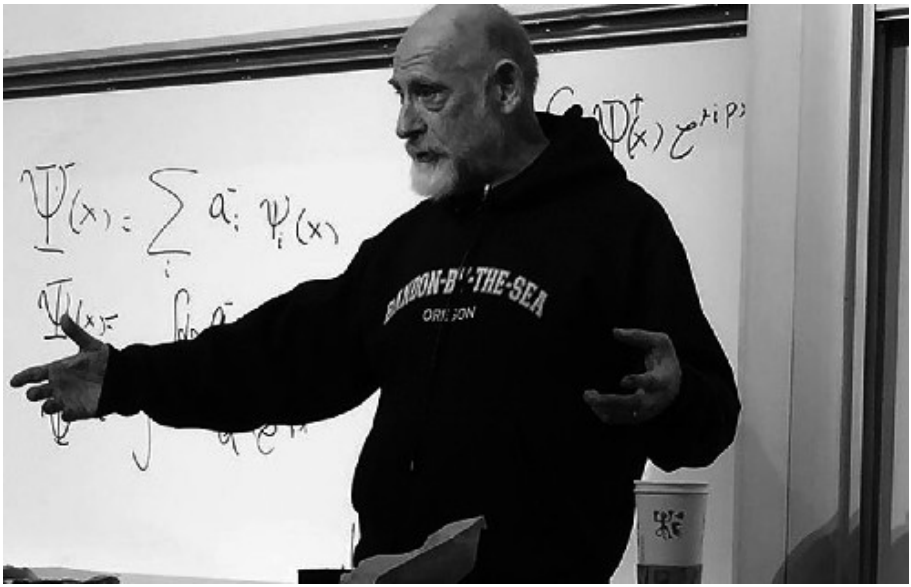
concepto de velocidad es relativo— tenía que ser correcta. Por tanto, Einstein se tomó en serio las teorías de ambos, Maxwell y Galileo, y asumió que sus esencias seguirían siendo válidas mucho más allá de las escalas a las que se habían comprobado. Consideró que tanto Galileo como Maxwell habían comprendido algo profundo sobre el mundo físico, algo que era, sencillamente, correcto. La esencia del descubrimiento de Galileo fue la equivalencia entre todos los sistemas inerciales y el carácter relativo de la velocidad. La forma particular de estas transformaciones entre sistemas inerciales era secundario. Por su parte, se sabía que las ecuaciones de Maxwell eran invariantes bajo las transformaciones de Lorentz. La cuestión crucial era demostrar que ambos conjuntos de transformaciones, galileanas y lorentzianas, no se contradecían entre sí. Este fue el primer gran logro de Einstein. Advirtió que la raíz del problema era una hipótesis aparentemente muy inocente: la idea de que la simultaneidad entre sucesos era independiente del observador. Abandonar el carácter absoluto del concepto de simultaneidad le llevó finalmente a la teoría especial de la relatividad. La moraleja es clara: fue la convicción de Einstein de que la esencia física de las teorías de Galileo y Maxwell eran correctas la que lo guio hacia su espectacular descubrimiento.

EL PRINCIPIO ANTRÓPICO

El principio antrópico es la idea de que los valores de las constantes fundamentales de la naturaleza sugieren que el universo está, de alguna manera, predestinado a tener vida. Esta idea ha cobrado peso en el discurso de los físicos teóricos, especialmente en círculos afines a la teoría de supercuerdas. Ahora bien, este principio se basa en una extraña lógica. Como afirmaba el gran paleontólogo estadounidense Stephen Jay Gould, el principio antrópico invierte causas y efectos, ya que la ingente evidencia física, fósil y genética demuestra que ha sido la selección natural de Darwin la que ha moldeado la vida para adaptarla al entorno. La vida se adapta al universo, no al revés.

Ciencia sin experimentación Los proponentes del principio antrópico defienden que ya es hora de extender el concepto de «ciencia»: la comprobación experimental para elegir una teoría y no sus com-

petidoras no puede ser el único criterio para definirla. Según ellos, la capacidad de una teoría para relacionar las observaciones con un conjunto de principios físicos, aunque estos no puedan comprobarse, debe considerarse como científica. ¿Qué diferencia hay entre este tipo de ciencia y cualquier otro conjunto de creencias más tradicionales? Ninguna. Escoge tu mandamás cósmico favorito y di que el universo es como es porque así aquel es feliz. Simple. Deja de molestarte en tratar de entender el universo. La respuesta está en tu mente.



Leonard Susskind, uno de los principales defensores del principio antrópico.

Se podrían citar muchos más casos como este en la historia de la física. La clave es que, en todos ellos, tomarse seriamente lo que nos han enseñado las teorías que han pasado la prueba de la experimentación ha conducido a avances muy significativos que han extendido de manera importante la teoría original. Huelga decir que es muy difícil hallar la clave que deshaga una aparente contradicción entre dos teorías. Este es el trabajo de la física fundamental. Y este trabajo se basa en la confianza en las viejas teorías, no en la búsqueda al azar de otras nuevas.

Una de las principales cuestiones de la filosofía moderna de la ciencia es entender la aparente paradoja que supone el hecho de que las teorías científicas cambian, pero mantienen parte de su

credibilidad. En cierto sentido, la situación de la filosofía moderna de la ciencia es una reacción a la caída de la mecánica newtoniana. El reconocimiento atormentado de que una teoría científica increíblemente satisfactoria pueda, al final, no ser verdadera. Ahora bien, quizá haya que considerar la idea de que un concepto de verdad que se sacude cuando aparece una teoría más fundamental es un concepto de verdad bastante pobre.

Una teoría física es una estructura conceptual que desarrollamos para organizar y entender el universo, y para hacer predicciones sobre él. Una teoría física es satisfactoria si hace todo esto de manera consistente, es decir, si supera el juicio de la experiencia repetidamente. La historia de la ciencia nos dice que no hay razón por la cual no podamos creer que siempre pueda existir una teoría más efectiva. No obstante, una nueva conceptualización de la realidad debe basarse en el conocimiento que ya ha sido obtenido gracias a las teorías anteriores. El pensamiento está en constante evolución, no es una entidad estática. La ciencia es el proceso mismo de la evolución del pensamiento.

Los descubrimientos de la mecánica clásica, el electromagnetismo, la relatividad o la mecánica cuántica son para siempre. No porque los detalles de estas teorías no puedan cambiar (pues sí lo hacen), sino porque nos enseñan que una parte importante de la naturaleza puede ser descrita en ciertos términos. Y esto es un hecho que perdurará para siempre. Esto plantea de inmediato la siguiente cuestión: ¿cómo puede una teoría física ser efectiva más allá del dominio donde se descubrió en un principio? ¿Cómo puede el pensamiento teórico ser tan poderoso? La respuesta es mucho más simple de lo que tratan de vendernos algunas doctrinas filosóficas modernas: mediante la observación, aprendemos algo

sobre la naturaleza, y luego usamos este conocimiento como guía para predecir otros fenómenos naturales. Por tanto, la impresionante capacidad predictiva de la física teórica es, sencillamente, un proceso de inducción, basado en el hecho contrastado de que existen patrones en los fenómenos naturales, a todos los niveles. El éxito de la ciencia en predecir hechos asociados a territorios inexplorados es tan comprensible (¡o incomprensible!) como la capacidad de una persona de predecir la salida del sol al día siguiente (pues no sabemos si esta regularidad, la salida del sol cada mañana, va a cambiar en algún momento). La cuestión es que la naturaleza rezuma regularidades que nosotros reconocemos, independientemente de que entendamos o no por qué existen. Estos patrones nos dan confianza —que no certeza— sobre el hecho de que el sol volverá a salir, del mismo modo que nos permiten predecir que, en el dominio inexplorado de la gravedad cuántica, se confirmarán, y no se violarán, las ideas revolucionarias que constituyen la esencia física de la relatividad general y la mecánica cuántica.

Esta visión sobre el progreso de la física está lejos de ser la dominante hoy día. Aparte de ella, podemos dividir a los físicos teóricos en otros tres grupos. Primero, el «pesimista» no tiene mucha confianza en la física teórica, ya que le preocupa que pueda pasar cualquier cosa entre las escalas ya estudiadas experimentalmente, esto es, lo que ya conocemos, y la escala de Planck. Segundo, el «valiente» sostiene que para hacer buena ciencia hay que explorar todo tipo de ideas extravagantes y violar las ideas respetables. Pero en ciencia, las ideas extravagantes son, simplemente, estériles. Los revolucionarios más grandes de la ciencia eran extremadamente conservadores, rozando lo obsesivo. Copérnico fue

forzado al heliocentrismo por su pedante trabajo sobre asuntos técnicos muy específicos del sistema de Ptolomeo. Kepler se vio obligado a abandonar los círculos debido a su análisis minucioso de la órbita de Marte. Estaba usando elipses como aproximaciones al sistema de epiciclos y deferentes, hasta que empezó a percatarse de que esas aproximaciones se ajustaban a los datos astronómicos mejor que los propios círculos. Y lo mismo se aplica a Einstein o Dirac, quienes realizaron sus pioneros hallazgos, no por profanar las ideas de sus colegas veteranos, sino por dedicar largas reflexiones a los problemas que les absorbían. En física teórica, lo novedoso siempre ha provenido bien de nuevos datos experimentales, bien de obsesivas reflexiones sobre las teorías existentes. Finalmente, el grupo «pragmático» ignora cualquier asunto conceptual y solo se preocupa de desarrollar una teoría. Esta actitud resultó ser muy fructífera en la década de 1960, ya que dio lugar al modelo estándar de la física de partículas. Pero por aquel entonces se obtenían nuevos datos experimentales casi a diario, lo que permitía seguir ese tipo de investigación. Hoy, los físicos teóricos no tienen nuevos datos, de momento. Para el pragmático esto no es ningún problema: solo se preocupa de desarrollar una nueva teoría, hasta el punto de que le importa poco si su teoría cada vez refleja menos el universo que observamos. La física teórica acaba convirtiéndose en un juego mental en el que se pierde la conexión con la realidad. Bienvenidos a la teoría de supercuerdas.

A lo largo de este libro hemos abordado el problema de la gravedad cuántica siguiendo la tradición reflexiva de Einstein: la gravedad cuántica de bucles respeta el legado de la relatividad general y la mecánica cuántica. Hemos visto cómo modifica nuestra comprensión de los conceptos de espacio y tiempo a las escalas

más fundamentales, donde los átomos de espacio-tiempo revelan una estructura granular del universo. Además, la teoría contradice ideas tan populares como infundadas, como el Big Bang, sustituyéndolo por una historia en la que el universo no tuvo principio alguno, ni tendrá final. No está claro que esta teoría sea la anhelada teoría de la gravedad cuántica, pero el hecho de predecir fenómenos considerados como necesarios en ella, como la entropía de los agujeros negros, y de no violar nada de lo ya conocido, es bastante prometedor. Como siempre ocurre en la física, el universo tendrá la última palabra.

Bibliografía

BARBOUR, J., *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 1999.

CARROLL, S., *Desde la eternidad hasta hoy*, Madrid, Debate, 2015.

FERREIRA, P.G., *La teoría perfecta*, Barcelona, Anagrama, 2015.

PENROSE, R., *El camino a la realidad*, Madrid, Debate, 2015.

ROVELLI, C., *La realidad no es lo que parece*, Barcelona, Tusquets, 2015.

—*Siete breves lecciones de física*, Barcelona, Anagrama, 2016.

SCHRÖDINGER, E., *La estructura del espacio-tiempo*, Madrid, Alianza, 1993.

SMOLIN, L., *Three Roads to Quantum Gravity*, Nueva York, Basic Books, 2002.

—*Las dudas de la física en el siglo XXI*, Barcelona, Crítica, 2007.

—*Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*, Boston, Houghton Mifflin Harcourt, 2013.

WEINBERG, S., *Explicar el mundo*, Barcelona, Taurus, 2015.

ÍNDICE

Introducción	3
La revolución inconclusa	10
Átomos de espacio-tiempo	40
Cosmología cuántica	91
Observando las escalas más pequeñas	122
Bibliografía	158